

Preparación de Compuestos de Polipropileno con Altos Niveles de Fibra Corta de Bonote para uso en Productos por Inyección

Claudio Roberto Passatore^{1, *a}, Alcides Lopes Leão^{2,b}

and Derval dos Santos Rosa^{1,c}

¹ Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, 09210-971, SP, Brasil

² Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 18610-307, SP, Brasil

*^a cpassatore@uol.com.br, ^b alcideslopesleao@gmail.com, ^c dervalrosa@yahoo.com.br

Palabras clave: fibras, bonote, polipropileno, compuestos.

Resumen. El objetivo principal de esta investigación fue estudiar las propiedades de los compuestos de polipropileno (PP) que contienen diferentes proporciones (20, 40 y 60% en peso) de fibra corta de bonote (fibra vegetal natural) sin tratamiento de fibras, para uso en productos de inyección con aplicaciones en la industria automotriz, construcción y otros segmentos. Las muestras se prepararon en una única etapa usando un mezclador termocinético de alta intensidad (K-Mixer). Se usaron aditivos en la fracción másica de 3% en peso de compatibilizador (PP-g-MA), 2,2% en peso de aditivo de procesamiento y 0,12% en peso de antioxidante térmico. Los compuestos se caracterizaron por ensayo de tracción de acuerdo con ASTM D638-

10. Las propiedades de superficie de la matriz polimérica con aditivos se estudiaron determinando el ángulo de contacto (CA) en un tensiómetro de caída sésil y el índice de carbonilo (CI) mediante espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). Las propiedades térmicas del PP y la composición se evaluaron mediante prueba termogravimétrica, y la interfaz de la fibra y la matriz en los materiales compuestos se evaluaron usando imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM). El análisis de CA mostró que la matriz de PP con aditivos se ha vuelto menos hidrofóbica y el FTIR y el IC que hubo una mejor estabilización del PP con aditivos. Hubo un aumento en la estabilidad térmica de los materiales compuestos para todo el contenido de fibra, que fue hasta 15 °C por encima de PP para compuestos de fibra de coco. En el módulo de Young los valores mostraron que la inclusión de fibras reforzaba la matriz polimérica y aumentaba la rigidez de los materiales compuestos, especialmente en materiales compuestos que contenían 60% (% en peso) en los que los valores eran ~ 1.7 veces mayores que el polipropileno. Las imágenes de las micrografías mostraron la interacción de la fibra en la matriz y que a pesar del carácter hidrofílico de las fibras y el carácter hidrofóbico del PP, los compuestos mostraron interfaces no homogéneas. Estos hallazgos confirman la viabilidad de utilizar un alto nivel de fibra de coco en compuestos de polipropileno incluso sin pretratamiento de las fibras y la preparación de las muestras por inyección.

1. Introducción

En los últimos 20 años ha habido un progreso considerable en el desarrollo de nuevos materiales poliméricos, particularmente materiales compuestos reforzados con fibras naturales y minerales, para aplicaciones en las industrias aero-naval, petroquímica, marina y automotriz, así como en la construcción [1-6]

Los compuestos se consideran mejores que las matrices poliméricas de un solo componente debido a su capacidad mejorada para distribuir el estrés en toda la matriz. Esto se logra al incorporar una segunda fase dispersa que produce un mayor módulo de tracción, lo que resulta en propiedades mecánicas mejoradas, especialmente la elasticidad (rigidez) y la resistencia a la rotura. Este efecto de refuerzo se puede lograr mediante la adición de fibras naturales o sintéticas para obtener materiales con un excelente rendimiento estructural (resistencia mecánica), bajo peso y bajo costo [7]. Las fibras naturales se pueden obtener a partir de madera, fibras vegetales, fibras animales y

fibras minerales, todas las cuales varían en forma, dimensión

Todos los derechos reservados. Ninguna parte del contenido de este documento puede reproducirse o transmitirse de ninguna forma ni por ningún medio sin el permiso por escrito de Trans Tech Publications, www.ttp.net. (ID: 194.81.199.106-03/08/15,12:04:17)

y morfología [7, 8]. Los polímeros termoplásticos como el nylon, polipropileno y polietileno, así como el poliéster insaturado termoendurecible y la resina epoxi, se han utilizado en compuestos con fibras naturales procedentes de madera, piña, lino, sisal, bonote, piasava, paja de trigo, palma, yute y curaua [2, 6, 9-17].

El uso de fibras naturales para reforzar matrices poliméricas es particularmente importante debido a las implicaciones ambientales, socioeconómicas y de desarrollo para una sociedad sostenible que busca cada vez más obtener materiales renovables, biodegradables y no tóxicos con un consumo energético mínimo y una reducción en la eliminación inadecuada de residuos y reciclaje [5, 7, 18-20].

El bonote o el coco es el fruto del cocotero (*Cocos nucifera L.*), que pertenece a la subfamilia *Cocoideae*, familia *Palmae* y *Monocot Class*. La fibra de bonote se extrae del mesocarpio y la cantidad de fibra que se obtiene de cada fruto es sustancial, en general del orden del 25% en masa. La producción mundial de fibra de bonote en 2011 fue de 60 millones de toneladas. Los principales productores mundiales de coco ese año fueron Indonesia con 19,5 millones de toneladas, Filipinas (15,3 millones de toneladas) e India (10,9 millones de toneladas). Brasil produjo 2,7 millones de toneladas, lo que representa menos del 0,5% de la producción mundial. Sin embargo, Brasil es el principal productor en América del Sur, con un 87,6% de la producción del continente. Dentro del país, la región nororiental es responsable del 70% de la producción de coco, y los estados de Bahía, Sergipe y Ceará en la región representan el 50% de la producción nacional [21].

Numerosos estudios han comparado varios métodos para obtener materiales compuestos con propiedades satisfactorias. El uso de mezcladores internos, mezcladores termocinéticos de tipo calendario y extrusoras de tornillo mono o doble [16, 22, 23]. Además, varios estudios han examinado el efecto del uso de aditivos de acoplamiento o agentes de acoplamiento para mejorar la interacción en la interfaz fibra-matriz, debido a la incompatibilidad química entre las fibras naturales hidrófilas y las matrices termoplásticas hidrófobas. El mecanismo real de interacción de estos compatibilizadores con la fibra/relleno generalmente se supone que las poliolefinas injertadas con anhídrido maleico (MA) como polipropileno (PP-g-MA) interactúan con la fibra/relleno natural a través de enlaces éster y/o puentes de hidrógeno [3, 24, 25]. Otros aspectos importantes son la influencia del contenido, la dimensión y la existencia del pretratamiento de las fibras [3, 23, 24, 26].

Para evaluar el uso de agentes de acoplamiento, Leblanc et al. prepararon compuestos de PP reforzado con 30% (% en peso) de fibra de coco verde de origen brasileño, mediante mezcla en fusión en un mezclador Haake, y se estudiaron sus propiedades en los estados fundido y sólido mediante ensayos mecánicos y microscopía electrónica de barrido (SEM). El efecto de la carga de fibra con la adición de 1 a 3% de PP-g-MA también fue investigado. Se descubrió que esta adición mejoraba la humectabilidad de las fibras mediante el polímero fundido, pero el efecto era tan pequeño que las reacciones químicas específicas no podían considerarse eficientes. El aumento en el módulo de flexión confirmó los efectos de fortalecimiento de la fibra [13].

La búsqueda de compuestos con alto contenido de fibra ha sido deseada y en este sentido Bledzki et al. [12] compararon las propiedades de los compuestos de polipropileno que contienen 40% (% en peso) de fibras de bonote, grano y madera en ausencia y presencia de polipropileno al 5% (% en peso) con anhídrido maleico (PP-g-MA) como aditivo de agente de acoplamiento. El análisis de las propiedades mecánicas, químicas, térmicas y morfológicas de estos materiales compuestos mostró que la resistencia a la tracción de un compuesto que contiene fibra de trigo era un 10% mayor que la de un compuesto que contiene fibra de madera. Para el alargamiento a la rotura, la inclusión de fibra de bonote dio como resultado valores 80% más altos que para la madera, mientras que para el trigo, el aumento fue solo del 40% en comparación con la fibra de madera. Se observó un comportamiento similar al anterior para la resistencia al impacto de Charpy, aunque el porcentaje de aumento real fue menor (solo 20% y 35% más que la fibra de madera, respectivamente). Las diferencias en las propiedades de estos materiales compuestos, incluida la resistencia a la tracción, se atribuyeron en gran parte a las variaciones en la forma morfológica y las propiedades de superficie de las fibras.

De acuerdo con Santos et al. [27], las fibras con longitudes inferiores a 10 mm se pueden clasificar como cortas. En el estudio, los autores prepararon compuestos de PP con fibras de bonote

y resaltaron las dificultades de alimentar extrusoras y máquinas de moldeo por inyección con fibras más largas. También observaron en el procesamiento de compuestos en una extrusora de doble tornillo con la adición de 30% de fibras de coco que a

temperaturas más altas hubo un aumento en la fluidez del polímero y este efecto disminuyó las fuerzas de corte en las fibras de refuerzo, minimizando su rotura durante el procesamiento. Ellos teorizaron que esto puede facilitar la alineación de las fibras durante la inyección, produciendo un aumento en la rigidez del material, es decir, su módulo elástico.

A pesar de los diversos estudios [11, 12, 26-30] mencionados anteriormente, existen pocos estudios que comparen compuestos que contengan diferentes tipos de fibras, particularmente para contenidos > 40% en peso. En este estudio, examinamos las propiedades de los compuestos de polipropileno que contienen fibra de bonote a altos contenidos (hasta 60% en peso) sin pretratamiento de las fibras (fibras en la naturaleza) y en la longitud corta. Las propiedades de estos compuestos se compararon con las de compuestos que contienen cantidades similares de carbonato de calcio que es un relleno mineral tradicional.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Polipropileno (PP) indicado para compuestos y procesamiento de moldeo por inyección (tipo CP 202XP; índice de flujo de fusión: 26 g.10 min⁻¹ según lo determinado por ASTM D1238) fue suministrado en forma de gránulos por Braskem S.A. (Triunfo, RS, Brasil).

El agente de acoplamiento polipropileno con anhídrido maleico (PP-g-MA) (nombre comercial - Licocene PP MA 7452 TP, suministrado en forma granular; Clariant S/A, São Paulo, SP, Brasil). Licolub H12 (Clariant S/A, São Paulo, SP, Brasil) y estearato de calcio (Chemson Ltda., Rio Claro, SP, Brasil) se utilizaron como lubricantes de procesos externos e internos, respectivamente, y Hostanox (Clariant S/A, São Paulo, SP, Brasil) fueron usados como un antioxidante térmico.

2.2. Procesamiento de compuestos

Los compuestos de PP con fibras de bonote (in natura) en los contenidos 20%, 40% y 60%,% en peso, como se muestra en la Tabla 1, se procesaron usando un mezclador K de tipo termocinético (modelo MH-1000 CT, MH Equipamentos Ltda., Guarulhos, SP, Brasil) equipado con un módulo de control de temperatura de la sonda para generar parámetros de procesamiento gráfico y un sistema para eliminar la humedad de los materiales durante el procesamiento.

Las fibras de bonote fueron molidas recientemente (sin tratar) en un rebanador móvil y estacionario modelo TE-625 (Tecnal Ltda., Piracicaba, SP, Brasil) y posteriormente pasadas a través de un tamiz con un rango de fraguado manual de ≤ 3 mm (malla 8).

Las muestras de compuestos se prepararon en reactores discontinuos (cuatro cargas de cada composición) y las materias primas se pesaron y se procesaron con la alimentación directa de los materiales. La temperatura máxima de procesamiento fue de 190 ° C, las velocidades de procesamiento fueron 3800 rpm y 3000 rpm y la humedad fue eliminada durante el procesamiento del compuesto.

Tabla 1 - Peso fraccional de los componentes utilizados para preparar los compuestos de polipropileno (PP).

Componentes	Proporción de componentes utilizados en la preparación de		
	Contenido de fibra o relleno mineral (%)	PP (% p/p)	Aditivos*
PPagregado	0,0	94,68	0,2% Estearato de calcio 0,12% Antioxidante Hostanox 2% Licoclub H12 3% de Licocene PP MA 7452
Fibra de Bonote	20,0	74,68	
	40,0	54,68	
	60,0	34,68	

* Todos los compuestos contenían el mismo porcentaje de aditivos.

2.3. Preparación de espécimen

Después de la preparación, los materiales compuestos, en forma de masa sólida, se molieron en un molino (modelo P2005G 20CV, Primotécnica Mecânica e Eletricidade Ltda., Mauá, SP, Brasil) equipados con tres cuchillas giratorias, dos cuchillos fijos y una pantalla fija con Agujeros de 8 mm de diámetro. Posteriormente, los especímenes se procesaron utilizando una máquina de moldeo por inyección (modelo PIC-BOY 22, Petersen & Cia. Ltda., Sorocaba, São Paulo, Brasil). Las inyecciones se realizaron de acuerdo con ASTM D638-10 y ASTM D256 Tipo IV. El tiempo de ciclo total para la inyección fue de 30 segundos y las temperaturas usadas en las zonas 1 (boquilla), 2 y 3 fueron de 210°C, 210°C y 180°C, respectivamente.

2.4. Ángulo de contacto

El ángulo de contacto estático de la matriz polimérica (PP puro, PP después de la mezcla (sin aditivos) y la mezcla de PP con los aditivos se determinó utilizando la técnica de micro gota de agua sésil en un tensiómetro óptico (Attension Theta, Espoo, Finlandia) como el promedio de cinco medidas.

2.5. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR de la matriz polimérica (PP puro, PP después de la mezcla (sin aditivos) y la mezcla de PP con los aditivos se obtuvieron del equipo FTIR Frontier Perkin Elmer con escaneo de 600 a 4000 cm^{-1} y 10 escaneos utilizando un accesorio ATR y los datos procesados con el software Pyris y Origin 8.

2.6. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis TGA se ejecutó en un dispositivo modelo STA 449 F3 Júpiter de Netzsch bajo N_2 , utilizando una velocidad de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ en el rango de 25-800 $^{\circ}\text{C}$ y los datos procesados con el software Proteus y Origin 8.

2.7. Ensayo de tracción

La resistencia a la tracción se determinó en una máquina de prueba mecánica universal (modelo 5569, Instron, São José dos Pinhais, Paraná), de acuerdo con ASTM D638-10, utilizando muestras de tipo IV y una velocidad de plato de 25 mm.min^{-1} con diez determinaciones [31].

2.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las superficies de los composites se investigaron mediante observación microscópica JEOL modelo JSM 6010 LA, en muestras inyectadas congeladas-fracturadas después de 10 minutos en N_2 , en la muestra no recubierta, modo SEI, a 5 mm de distancia y 1 kV.

3. Resultados y discusión

3.1. Ángulo de contacto

La influencia de los aditivos, especialmente el compatibilizador (PP-g-MA), sobre las propiedades de la superficie de los compuestos se evaluó determinando el ángulo de contacto usando la técnica de micro gota sésil. La Fig. 1 muestra el ángulo de contacto estático (theta) para polipropileno puro y polipropileno procesado con y sin aditivos. El procesamiento y la inclusión de aditivos redujeron el ángulo de contacto. Esta reducción indicó que la presencia de aditivos reducía la hidrofobicidad del polipropileno, es decir, había una mayor humectabilidad con respecto al agua. Esta hidrofiliidad mejorada presumiblemente permite una mayor interacción de la matriz con fibras vegetales que contienen grupos hidroxilo libres, dando como resultado un compuesto con propiedades mejoradas. La mayor humectabilidad de las muestras de polipropileno procesadas con aditivos también puede atribuirse a los grupos polares que existen en el agente compatibilizante, estabilizador y lubricantes. Resultados similares fueron reportados por Cato [32], quienes evaluaron la influencia de diferentes porcentajes (1, 3, 5 y 7%) de un agente de acoplamiento (PP-g-MA) en una matriz polimérica. Hasta un 3% de agente de acoplamiento resultó en una reducción gradual en

el ángulo de

contacto mientras que en porcentajes > 3% los valores aumentaron, lo que sugirió la formación de residuos sin reaccionar de grupos del compatibilizador.

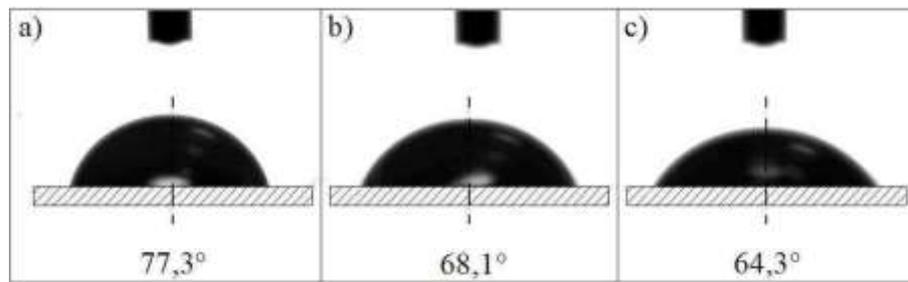


Fig. 1 - El ángulo de contacto para las superficies de (a) polipropileno puro, (b) polipropileno procesado y (c) polipropileno con aditivos.

3.2. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

La Fig. 2 presenta los espectros FTIR para PP y PP puros procesados con y sin aditivos. En dos estudios realizados por Albano et al. [33] y [34], los autores descubrieron que los picos en la región de 1450 a 1460 cm^{-1} corresponden a la cadena CH_2 , aquellos entre 1370 y 1380 cm^{-1} corresponden a la cadena CH_3 , aquellos entre 1670 y 1675 cm^{-1} a cadenas $\text{C}=\text{C}$, y los picos entre 3000 y 2800 cm^{-1} a cadenas $\text{C}-\text{H}$, todas las cuales son comunes en olefinas y típicas de PP. En el presente estudio, al comparar los espectros de las muestras de PP puro y los procesados con y sin aditivos, es posible observar que los cambios en las intensidades de los picos son probablemente generados por la presencia de los aditivos, y que estas alteraciones mejoran la estabilidad térmica, como se evidencia en el PP procesado sin aditivos, donde los picos CH_2 y CH_3 se redujeron, probablemente debido a la degradación por cizallamiento de la cadena de PP. Este efecto también se evidenció en el análisis de la IMF.

Para evaluar el efecto del envejecimiento térmico del PP y los materiales compuestos, calculamos el índice de carbonilo (CI) a partir de los espectros obtenidos, calculados mediante el uso de los picos entre 1880-1650 cm^{-1} , correspondiente a la aparición de compuestos que contienen carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) [34-36].

Estos compuestos en su mayor parte son el resultado de la oxidación del polímero, como se puede observar en los espectros FTIR en la región entre 1680 y 1780 cm^{-1} como bandas superpuestas, principalmente correspondientes a ácidos (1712 cm^{-1}), cetonas (1720 cm^{-1}), aldehídos (1730 cm^{-1}), ésteres (1743 cm^{-1}) y lactonas (1785 cm^{-1}). El valor máximo de absorbancia de 2722 cm^{-1} se relaciona con las vibraciones moleculares angulares del grupo CH y las vibraciones axiales del grupo CH_3 , y se utilizó para normalizar los espectros IR, porque no es sensible a la degradación oxidativa del PP [35, 37, 38].

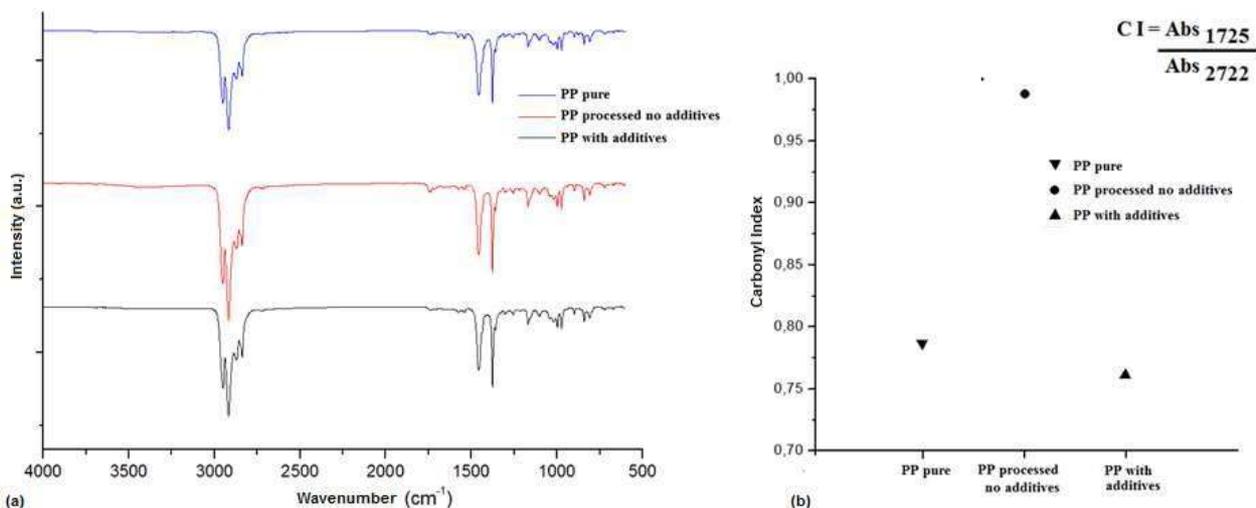


Fig. 2 - Espectros FTIR para las superficies de (a) polipropileno puro, (b) polipropileno procesado y

(c) polipropileno con aditivos.

La Fig. 2 (b) ilustra el comportamiento del índice de carbonilo (CI) para las muestras de PP, PP procesadas sin aditivos y PP procesadas con aditivos. El IC fue el más alto para el PP procesado sin aditivos, lo que indica una posible oxidación del PP durante el procesamiento. En otras palabras, se produjeron algunas alteraciones en la estructura química de la matriz del polímero y una oxidación menos pronunciada del PP procesado con aditivos, probablemente debido a la inclusión del agente antioxidante (Hostanox). Un comportamiento similar fue observado por Passatore et al. para la IMF [39], en la que para PP sin aditivos, la IMF aumentó significativamente.

3.3. Análisis termogravimétrico (TGA)

La estabilidad térmica de las fibras, la matriz de polímero y el material compuesto se evaluó con las curvas de pérdida de peso y la primera derivada de TG. En la Fig. 3 se puede ver que el procesamiento (PP sin aditivos procesados) reduce la temperatura de degradación inicial de PP, probablemente debido a la rotura de cadenas en función de la cizalladura producida durante el procesamiento [40] y sus aditivos (PP con aditivos) esto aumenta la estabilidad térmica incluso después del procesamiento con los mismos parámetros de proceso, generados debido a la estabilización térmica por aditivos, particularmente antioxidantes térmicos. En la literatura, parece que un único pico en el PP se refiere a la degradación de enlaces saturados e insaturados de átomos de carbono y el cambio a temperaturas más altas en el PP procesado con aditivos indicó una buena dispersión de los aditivos en la matriz [41, 42].

En la Tabla 2 se muestran la temperatura del 5% menos de masa y los picos de inicio de la temperatura de degradación del compuesto en comparación con PP puro, revelando que los compuestos no solo tienen una etapa de descomposición como la observada para PP, sino dos picos distintos. Según los estudios, el primero es la degradación de la celulosa y la lignina en las fibras y el segundo de los enlaces saturados e insaturados, que pertenecen a la matriz del polímero [24, 43].

La temperatura del máximo en la curva TG derivada fue en el siguiente orden, primero las fibras (Tabla 2), luego el PP (Fig. 3b) y finalmente el compuesto (Tabla 2), lo que indica una buena interacción entre la fibra y la matriz polimérica [9, 43]. La temperatura más alta al comienzo de la degradación del compuesto en comparación con las fibras es causada por la protección de la fibra para la matriz polimérica (PP), presente en los compuestos [42]. Los valores más altos para la temperatura máxima de degradación de los composites en comparación con PP destacan la buena interacción de los compuestos de matriz de fibra que mejora su estabilidad térmica, incluso con un mayor contenido de fibra en los compuestos (40 y 60%, % en peso).

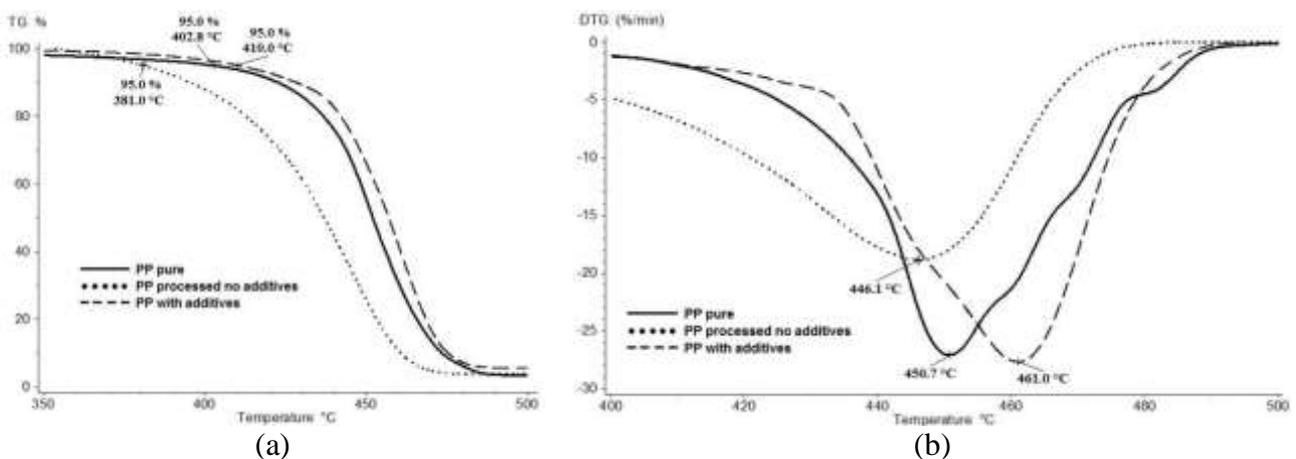


Fig. 3 - (a) Curva de pérdida de masa frente a la temperatura de PP puro, PP sin aditivos procesados y PP con aditivos. (b) Curva de la primera derivada de PP puro, PP sin aditivos procesados y PP con aditivos e ilustración de la temperatura máxima de degradación.

Tabla 2 - Temperaturas de PP puro y los compuestos de PP con fibra de bonote.

Composición	Temperatura (°C)		
	Degradación n 5% pérdida de	Máxima degradación Primer pico	Máxima degradación Segundo pico
PP puro	402,8		450,7
Fibra de Bonote	57,4		321,0
PP + Bonote 20% (% en	308,1	328,7	465,2
PP + Bonote 40% (% en	237,0	328,0	464,4
PP + Bonote 60% (% en	222,8	328,8	463,2

3.4. Ensayos de tracción

Hubo un aumento en el módulo de Young (una indicación de rigidez) al aumentar la fibra. En la Fig. 4 se muestra que, en comparación con PP que contiene aditivo, todos los composites tenían un mayor módulo de Young en cada uno de los contenidos de fibra, aunque esto fue más marcado por 20% (% en peso), 40% y 60% (% en peso) con fibra de bonote; hubo un aumento del 20%, 44% y 71% con fibra de bonote, respectivamente, en comparación con el polipropileno con aditivo. Pimenta et al. [26], que estudiaron materiales compuestos con un 20% (% en peso) de fibra de sisal sometida a diferentes tratamientos, informaron valores para el módulo de Young 60-80% más altos que para el polipropileno; estos aumentos fueron mayores que el 46% observado aquí para las fibras que no se habían lavado o sometido a ningún otro tratamiento.

Santos concluyó que los compuestos que contienen fibra de coco, por ejemplo, tienen propiedades mecánicas más débiles que los compuestos con otras fibras (ramio, curaua, sisal), debido al bajo contenido de celulosa y alto contenido de lignina, a pesar del aspecto favorable de la fibra de coco representada por la presencia de una capa cerosa (ácidos grasos de cadena larga) en la superficie de la fibra, que puede mejorar la compatibilidad en materiales compuestos con polímeros [44].

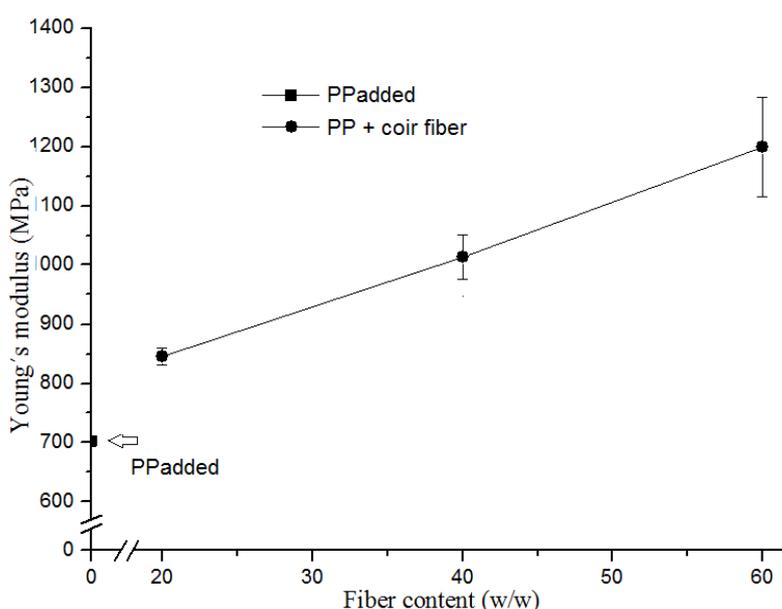
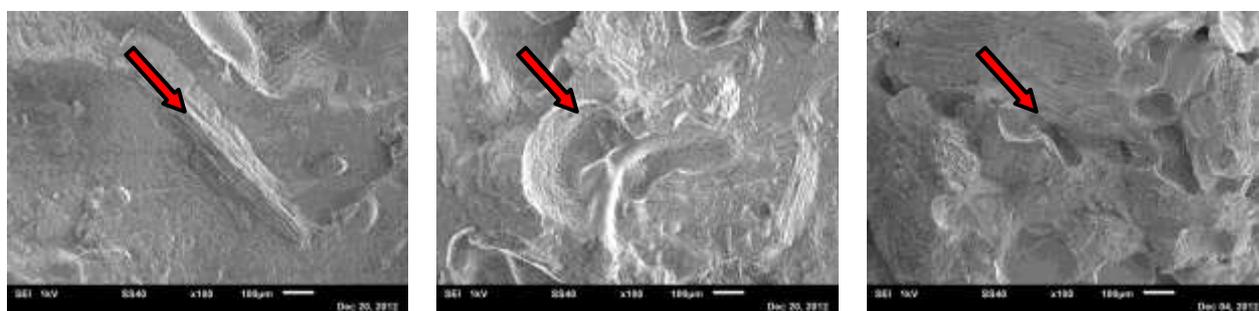


Fig. 4 - Módulo de Young para materiales compuestos de polipropileno y aditivos que contienen polipropileno de acuerdo con los tipos de fibras y cargas. Los puntos son la media \pm desviaciones estándar (DE) de diez determinaciones.

3.5. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Fig. 5 muestra las imágenes de fotomicrografías de fibras compuestas con bonote en los niveles de 20, 40 y 60% en peso. La Fig. 5 (a) muestra superficies más homogéneas con fibras adheridas a la matriz (sin salientes) y sin huecos en la interfaz fibra-matriz, lo que indica una buena interacción y, en consecuencia, una mejor adhesión. La Fig. 5 (b) y (c) muestran la extracción de la fibra de la matriz, indicando una adhesión débil en la matriz. Leão (45) observó que la fibra de coco tiene una superficie áspera cubierta por capas de ceras y extractos, además de los componentes amorfos como la hemicelulosa y la lignina [45]. Esta superficie favorece la interacción de la fibra con la matriz polimérica y los compatibilizadores, lo que explica las buenas propiedades mecánicas obtenidas, incluso en los materiales compuestos con el mayor contenido de fibra (60% en peso). Dwived et al. [11] consideraron esta interacción entre fibra y matriz como normal, especialmente en fibras no tratadas. Bledzki et al. [12] descubrieron que los compuestos con 40% en peso de fibras sin tratamiento presentan algún efecto de extracción, como imágenes similares que se muestran en este trabajo.



20% % en peso (a)

40% % en peso (b)

60% % en

peso (c) Fig. 5 - Imágenes fotomicrografías de compuestos de PP con bonote (100x).

4. Conclusión

Los resultados de este estudio demuestran la viabilidad de utilizar altos niveles de fibras cortas de plantas naturales para preparar compuestos ecológicos para aplicaciones mediante inyección. Los aditivos utilizados en los compuestos, especialmente el antioxidante térmico y el compatibilizador fueron adecuados y la estabilidad térmica aumentada de la matriz polimérica para el uso de los mismos, en la preparación de materiales compuestos. Hubo un aumento en la estabilidad térmica del compuesto en todos los niveles de fibras (20, 40 y 60% en peso), y este aumento fue de hasta 15 °C para compuesto con fibra de coco con 20% en peso.

Los resultados para el módulo de Young sugieren que se pueden usar diversas concentraciones (20, 40 y 60%, % en peso) de fibras de diferentes fuentes. Los valores de rigidez de los materiales compuestos que contienen fibra de coco son superiores al aditivo que contiene polipropileno. Debido a esto, fue posible verificar en este trabajo que la mala adhesión entre las fibras hidrófilas y la matriz polimérica hidrófoba no impedía la incorporación de altos niveles (60% en peso) de fibras vegetales naturales en compuestos de PP con los buenos.

Estos resultados también muestran que el método de procesamiento fue eficiente, una vez que no hubo necesidad de alterar las fibras superficiales (con tratamiento químico, lavado o secado previo); esta falta de pasos intermedios redujo la cantidad de energía necesaria y facilitó la preparación de los buenos materiales compuestos de PP + bonote.

Reconocimientos

Este trabajo fue apoyado por el CNPq - Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (subvención n°. 447180/2014-2) y FAPESP - Fundación de Investigación del Estado de São Paulo (beca n°. 2012/13445-8).

Referencias

- [1] A.L. Leao; R.M.F. Teixeira; P.C. Ferrao. Production of reinforced composites with natural fibers for industrial applications - Extrusion and injection WPC. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2008;484:523-32.
- [2] A.L. Leao; R.M. Rowell; N. Tavares. Applications of natural fibers in the Brazil automotive industry - Thermoforming and injection-molding processes 1997.
- [3] L. Sobczak; O. Brüggemann; R. Putz. Polyolefin composites with natural fibers and wood modification of the fiber/filler–matrix interaction. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012.
- [4] D.B. Dittenber; H.V.S. GangaRao. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012;43(8):1419-29.
- [5] V.L.P. Salazar; A.L. Leão; D.S. Rosa; J.G.C. Gomez; R.C.P. Alli. Biodegradation of Coir and Sisal Applied in the Automotive Industry. *J Polym Environ*. 2011;19(3):677-88.
- [6] M. Boopalan; M. Umopathy; P. Jenyfer. A Comparative Study on the Mechanical Properties of Jute and Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites. *Silicon*. 2012:1-5.
- [7] C. Baillie. *Green Composites: Polymer Composites and the Environment*: Taylor & Francis; 2005.
- [8] S. Mukhopadhyay; R. Srikanta. Effect of ageing of sisal fibres on properties of sisal - Polypropylene composites. *Polymer Degradation and Stability*. 2008;93(11):2048-51.
- [9] M. Ardanuy; M. Antunes; J.I. Velasco. Vegetable fibres from agricultural residues as thermo-mechanical reinforcement in recycled polypropylene-based green foams. *Waste Management*. 2012;32(2):256-63.
- [10] K. Jayaraman. Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation. *Composites Science and Technology*. 2003;63(3-4):367-74.
- [11] U.K. Dwivedi; N. Chand. Influence of MA-g-PP on abrasive wear behaviour of chopped sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(12-13):5371-5.
- [12] A.K. Bledzki; A.A. Mamun; J. Volk. Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties. *Composites Science and Technology*. 2010;70(5):840-6.
- [13] J.L. Leblanc; C.R.G. Furtado; M.C.A. M. Leite; L.L.Y. Visconte; M.H. Ishizaki. Investigating polypropylene-green coconut fiber composites in the molten and solid states through various techniques. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006;102(2):1922-36.
- [14] U. Hujuri; S.K. Chattopadhyay; R. Uppaluri; A.K. Ghoshal. Effect of maleic anhydride grafted polypropylene on the mechanical and morphological properties of chemically modified short-pineapple-leaf-fiber-reinforced polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2008;107(3):1507-16.
- [15] C.M.C. Bonelli; A. Elzubair; J.C.M. Suarez; E.B. Mano. Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava. *Polímeros*. 2005;15:256-60.
- [16] D.R. Mulinari; H.J.C. Voorwald; M.O.H. Cioffi; C.A.A. Lima; C.A.P.R. Baptista; G.J.M. Rocha. Composite materials obtained from textile fiber residue. *J Compos Mater*. 2011;45(5):543-7.

- [17] F. Harnnecker; D.S. Rosa; D. Lenz. Biodegradable Polyester-Based Blend Reinforced with Curauá Fiber: Thermal, Mechanical and Biodegradation Behaviour. *J Polym Environ.* 2012;20(1):237-44.
- [18] S.M. Luz; A. Caldeira-Pires; P.M.C. Ferrão. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components. *Resources, Conservation and Recycling.* 2010;54(12):1135-44.
- [19] P. Wambua; J. Ivens; I. Verpoest. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology.* 2003;63(9):1259-64.
- [20] S.V. Joshi; L.T. Drzal; A.K. Mohanty; S. Arora. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2004;35(3):371-6.
- [21] Information on <http://www.sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Coco/ACulturadoCoqueiro/importancia.htm>
- [22] S.A.S. Goulart; T.A. Oliveira; A. Teixeira; P.C. Miléo; D.R. Mulinari. Mechanical Behaviour of Polypropylene Reinforced Palm Fibers Composites. *Procedia Engineering.* 2011;10(0):2034-9.
- [23] E.F. Cerqueira; C.A.R.P. Baptista; D.R. Mulinari. Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. *Procedia Engineering.* 2011;10(0):2046-51.
- [24] A.K. Gupta; M. Biswal; S. Mohanty; S.K. Nayak. Mechanical, Thermal Degradation, and Flammability Studies on Surface Modified Sisal Fiber Reinforced Recycled Polypropylene Composites. *Advances in Mechanical Engineering.* 2012.
- [25] L. Sobczak; R. Welsler; O. Brüggemann; A. Haider. A. Polypropylene (PP)-based wood polymer composites: Performance of five commercial maleic anhydride grafted PP coupling agents. *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* 2012.
- [26] M.T.B. Pimenta; A.J.F. Carvalho; F. Vilaseca; J. Girones; J.P. Lopez; P. Mutje; A.A.S. Curvelo. Soda-Treated Sisal/Polypropylene Composites. *J Polym Environ.* 2008;16(1):35-9.
- [27] E.F. Santos; M. Moresco; S.M. Rosa; S. Nachtigall. Extrusion of PP composites with short coir fibers: effect of temperature and coupling agents. *Polímeros.* 2010;20(3):215-20.
- [28] R.D.O. Polkowski; J.D.V. Barbosa. Caracterização de compósitos de PP com fibras curtas de sisal: Efeito do processo de corte das fibras. 12º Congresso Brasileiro de Polímeros-12º CBPol. Florianópolis, SC, Brasil2013.
- [29] P.J. Herrera-Franco; A. Valadez-González. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering.* 2005;36(8):597-608.
- [30] B. Mano; J. Araújo; M. Spinacé; M.A. De Paoli. Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. *Composites Science and Technology.* 2010;70(1):29-35.
- [31] D638-10 D. Standard test method for tensile properties of plastics. 2011.
- [32] A.L. Catto; B.V. Stefani; V.F. Ribeiro; R.M.C. Santana. Influence of coupling agent in compatibility of post-consumer HDPE in thermoplastic composites reinforced with eucalyptus fiber. *Materials Research.* 2014.
- [33] C. Albano; J. Reyes; M. Ichazo; J. Gonzalez; M. Brito; D. Moronta. Analysis of the mechanical, thermal and morphological behaviour of polypropylene compounds with sisal fibre and wood flour, irradiated with gamma rays. *Polymer Degradation and Stability.* 2002;76(2):191-203.

-
- [34] C.A. Cáceres; S.V. Canevarolo. Degradação do polipropileno durante a extrusão ea geração de compostos orgânicos voláteis. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2009;19(1):79-84.
- [35] X. Wang; W. Yu; Q. Nie; Y. Guo; J. Du. A real-time study on the evolution of the degradation of polypropylene during mixing process. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011;121(2):1220-43.
- [36] M.A. De Paoli. Degradação e estabilização de polímeros: Artliber; 2009.
- [37] C. de Carvalho; A. Silveira; D.S. Rosa. A study of the controlled degradation of polypropylene containing pro-oxidant agents. *SpringerPlus*. 2013;2(1):1-11.
- [38] A.C. Babetto; S.V. Canevarolo. Efeito do tipo de elemento de rosca na degradação de polipropileno durante múltiplas extrusões. *Polímeros: ciência e tecnologia*. 2000;10(2):90-9.
- [39] C.R. Passatore. Dissertação de mestrado em nanociências e materiais avançados na Universidade Federal do ABC (2014).
- [40] F. Rosário; W.M. Pachekoski; A.P.J. Silveira; S.F. Santos; H. Savastano Jr; S. A. Casarin. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. *Polímeros*. 2011;21(2):90-7.
- [41] P.V. Joseph; G. Mathew; K. Joseph; G. Groeninckx; S. Thomas. Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Compos Pt A-Appl Sci Manuf*. 2003;34(3):275-90.
- [42] A.A. Morandim-Giannetti; J.A.M. Agnelli; B.Z. Lancas; R. Magnabosco; S.A. Casarin; S.H.P. Bettini. Lignin as additive in polypropylene/coir composites: Thermal, mechanical and morphological properties. *Carbohydrate Polymers*. 2012;87(4):2563-8.
- [43] P.V. Joseph; K. Joseph; S. Thomas; C.K.S. Pillai; V.S. Prasad; G. Groeninckx; M. Sarkissova. The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Compos Pt A-Appl Sci Manuf*. 2003;34(3):253-66.
- [44] E.F. Santos. Efeito de agentes de acoplamento em compósitos de polipropileno com fibras de coco. 2007.
- [45] R.M. Leão. Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno. Dissertação de mestrado em ciências mecânicas. 2012.