

Comportamiento mecánico de fibras henequén cubano e interfase con polímeros termoplásticos del tipo poliolefina

Mechanical behavior of Cuban henequen fibers and interphase with thermoplastic polymers of the polyolefin family

Daniel Díaz-Batista^{1*}, Daniel Díaz-Forcelledo¹, Marta Mazorra-Mestre¹,
José-Luis Valín-Rivera^{II}

I. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.

II. Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.

Correo electrónico: danieldiaz@mecanica.cujae.edu.cu

Recibido: 20 de febrero de 2015

Aceptado: 5 de julio de 2015

Resumen

El aprovechamiento de las fibras lignocelulósicas de agave fourcroydes o henequén, cultivado en las condiciones de Cuba, para el diseño de un material compuesto con matriz de termoplástico, demandó conocer su comportamiento mecánico y el de la interfase con los polímeros propuestos como matriz. Se ensayaron fibras de la región de Limonar provincia de Matanzas, encontrándose valores de resistencia típicos de 500 MPa, mostrándose además estadísticas de otros parámetros como el área de la fibra y la relación perímetro-área. La interacción con polietileno de baja densidad dio como resultado un valor de

resistencia al corte interfacial de 5,6 MPa, en cambio utilizando el copolímero de etileno 1-hexeno se alcanzó 8,4 MPa. Para estas condiciones se obtuvo longitudes críticas de 8,1 milímetros y menores. Se presentó una forma de preparación de las muestras para el ensayo de desprendimiento a tracción y un diseño de dispositivo para llevar a cabo esta prueba.

Palabras clave: henequén, polímero termoplástico, fibra lignocelulósica, interfase, material compuesto

Abstract

Incorporating fibers from agave fourcroydes, also named henequen, grown in Cuban farm conditions, into thermoplastic-matrix compositedesign took evaluating mechanical behavior of both the fiber and interphase with polymeric matrix candidates. Fibers from Limonar area in the province of Matanzas were tested, finding 500 MPa as typical tensile strength value. Statistical of fiber cross sectional area and perimeter to cross sectional area ratio is also showed. Fiber interaction with low density polyethylene yielded an interphase shear strength equal to 5.6 MPa but increased to 8.4

interacting with ethylene 1-hexene copolymer. For these experimental conditions, critical lengths of 8.1 millimeters and shorter were obtained. Are also presented both, an alternative to prepare pull-out test specimens and a device to evaluate them in a universal tensile testing machine.

Keywords: henequen, thermoplastic polymer, lignocellulosic fiber, interphase, pull-out test, composite material

Introducción

En la búsqueda de un mayor aprovechamiento de los recursos que brinda la naturaleza y su puesta al servicio de la solución de problemas sociales se inscribe un grupo de investigaciones que se realizan para el uso de fibras naturales. El henequén (*Agave fourcroydes*) se cuenta entre las fuentes importantes de material fibroso para los países de la región de Centroamérica y el Caribe, junto a otras plantas que se cultivan comercialmente como la caña de azúcar. México, en primer lugar y Cuba se destacan por los volúmenes de fibra producidos a partir de esta planta, la cual ha sido considerada como un cultivo estratégico debido a que es capaz, al igual que la caña de azúcar, de aprovechar de forma muy eficiente la radiación solar.

En el presente trabajo se hace una caracterización del comportamiento mecánico de la fibra de henequén cubano, obtenidas en la región de Limonar, provincia de Matanzas, donde se ubica la Fábrica "Eladio Hernández", la mayor productora de esa fibra en Cuba actualmente. Los resultados se comparan con los obtenidos por otros autores [1,2] con fibras cultivadas en condiciones climáticas diferentes a las de nuestro país.

Este trabajo expone los resultados parciales de una investigación en curso, para obtener materiales compuestos con matriz de polímero termoplástico a partir de fibras de henequén. Para el diseño de estos materiales compuestos, el problema fundamental, cuando se desea predecir el comportamiento mecánico, es conocer la resistencia mecánica de la fibra y de la interfase con la matriz.

Para la determinación de la resistencia de la fibra se resuelve un grupo de tareas que incluyen: la determinación del perímetro y el área de la sección transversal de las fibras, la medición de la fuerza de rotura de cada una y cómputo de los valores de tensión. La caracterización continúa con la evaluación de la

resistencia de la interfase. Con el henequén se han realizado trabajos en la preparación de materiales compuestos (MC) con matriz de polietileno de alta densidad [1] que fundamentan su trabajo con un estudio de la interfase. También han servido como referencia, a la hora de seleccionar los métodos de caracterización y análisis del comportamiento mecánico, los trabajos publicados utilizando otras fibras, de agaváceas [3], bagazo de caña de azúcar [4], u otras [5, 6, 7].

Hoy día, la creación de materiales compuestos para distintas aplicaciones es un proceso que lleva un trabajo previo que permite predecir con gran precisión su desempeño y corregir problemas antes de ponerlos en servicio. Estudios para esclarecer aspectos relacionados con la degradación térmica [8], el proceso de combustión [9,10] y la formación o ruptura de enlaces químicos [1, 4] se incluyen en la caracterización de materiales como los que son objeto de estudio en esta investigación y permiten trazar estrategias para definir su ciclo de vida.

Métodos y Materiales

Materiales

Como matriz para los compuestos de una sola fibra se utilizaron: polietileno de baja densidad (PEBD) (Índice de fluidez (IF):0,4g/10 min con 2,16 kg) (temperatura de procesamiento (TP): 180°C) de la firma *Sinopec* (República Popular China). Polietileno de alta densidad (PEAD) 5703L (IF: 0,30 g/10min con 2,16 kg) (TP: 190°C) de la firma *Repsol* y co-polímero de etileno con 1-hexeno, 60120U, (IF: 19 g/10min con 2,16 kg) (TP: 210°C) producido por *PEMEX*

Se utilizaron fibras de henequén provenientes de la región de Limonar, provincia de Matanzas, aportadas por la Empresa "Eladio Hernández", entidad procesadora agroindustrial. En el proceso, las fibras fueron separadas o liberadas de otros tipos de tejido que integran la hoja de la planta y de la mayor parte del líquido o jugo que las acompaña. En esa etapa las fibras permanecen unidas en grupos de acuerdo a la hoja de donde provienen, posteriormente son clasificadas y cortadas. Se tomó aleatoriamente grupos de fibras de un gran lote de producción, después que estas habían sido secadas al sol. En el laboratorio se liberaron de partículas sólidas pequeñas, residuos de tejido parenquimatoso o polvo y fueron finalmente cortadas. Para el ensayo de resistencia de la fibra, se tomaron fibras de entre 20 y 30 cm de longitud, buscando representatividad entre las fibras más delgadas, las de mediano grosor y los haces fibrosos más gruesos que no quedaron separados en el proceso de desfibrado. Estas fibras transitaron primero por el proceso de valoración del comportamiento mecánico de la interfase, donde se les midió con precisión el área de la sección transversal mediante fotomicrografía (el método de medición del área se explica más adelante), se les realizó la prueba de arranque o desprendimiento a tracción (*pull-out*) y a continuación se les midió la fuerza de rotura a cada una.

Equipos utilizados

- Cizalla manual
- Microscopio óptico y cámara digital Olympus (Fabricado en Japón)
- Placa de calentamiento modelo DBII con control de temperatura PID (Fabricada en China)
- Pie de rey Mitutoyo, con indicación digital y apreciación 0,01mm. (Fabricado en Japón)
- Máquina universal de ensayos de tracción Testometric modelo AX con celda de carga de 50 kN (Fabricada en Reino Unido)

Método para caracterización de la interfase fibra- matriz

En trabajos anteriores se reportan valores de resistencia de la fibra de henequén [1] y de otras agaváceas como la *Tequilana Weber* [3] cultivadas en las condiciones de México y se reportan valores de la resistencia al corte interfacial (τ_c) para un polímero termoplástico del tipo poliolefina: polietileno de alta densidad (PEAD) [1], o polipropileno (PP) [3]. En lo referente al grado de aproximación al valor de la resistencia de la fibra y la determinación de τ_c ya Valadez [1] refiere el uso del perímetro real de la sección transversal de la fibra (expresión 2), en lugar del diámetro aparente (expresión 1), para el cálculo de este parámetro.

$$\tau_c = \frac{F}{\pi d L} \quad (1)$$

Donde:

F es la fuerza para arrancar o desprender la fibra,

d es el diámetro aparente de la fibra y

L es la longitud de la parte de la fibra que está incluida o empotrada en la matriz.

También:

$$\tau_c = \frac{F}{P L} \quad (2)$$

Donde:

F y L son los mismos de la expresión 1 y P es el perímetro de la sección transversal de la fibra.

P se determina por procesamiento digital de imágenes a partir de las fotomicrografías de las secciones que se obtienen partir de un corte que se realiza a la muestra.

La tensión de rotura de la fibra σ_f se puede calcular como:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} \quad (3)$$

Donde:

F_f es la fuerza necesaria para romper la fibra y A_f es el área de la sección transversal de la misma.

Si se despeja L en (2), se despeja F_f en (3) y se sustituye en F de la expresión 2 se puede determinar la longitud de fibra inmersa, necesaria, para romper la fibra o longitud crítica, para el ensayo de arranque de la fibra por tracción y queda como sigue:

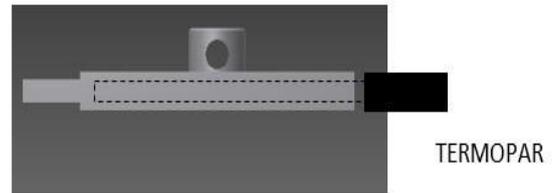
$$l_c = \frac{\sigma_f A_f}{\tau_c P} = [\text{mm}] \quad (4)$$

En el diseño de materiales compuestos es necesario tener en cuenta que la longitud crítica real o funcional de la fibra, que deberá ser el doble de este valor. Si se trata de romper la fibra, tirando de ella, sujetándola mediante la matriz donde está inmersa y tomándola por ambos extremos de la misma, si alguno de los dos extremos de la fibra tiene inmerso una longitud menor que la crítica entonces la fibra deslizará por ese extremo y no se romperá. Por razones de seguridad, en el diseño de materiales compuestos se toman valores mucho mayores que $2l_c$.

El método propuesto por Valadez y colaboradores [1] para la preparación de las muestras del ensayo de arranque de la fibra, puede generar errores incluso cambio en los resultados, por procesos de degradación [10, 8] producto de la permanencia de la fibra por un tiempo prolongado a las temperaturas de fusión del polímero y por la dificultad para la evacuación de gases que se quedan atrapados en ese proceso y por la dificultad para copiar la forma irregular de la fibra, en toda su superficie lateral, con un fluido viscoso en esas condiciones de confinamiento. En este trabajo se propone un método que trata de resolver esas limitaciones aunque puede tener sus propios problemas, como la generación de algunas muestras defectuosas que el investigador debe descartar. En cuanto al procesamiento e interpretación de los datos experimentales del ensayo de arranque de la fibra existen dos tendencias: una que da un seguimiento estadístico al proceso de deformación y rotura de las muestras [7] y otra basada en un exhaustivo trabajo experimental con un sistema bien sensible, que es capaz de capturar la información del proceso de rotura e interpretarlo a través de un diagrama de fuerza contra deformación [1,6]. En el análisis del proceso de rotura de nuestras muestras, se siguió esta segunda opción ya utilizada por los experimentadores Valadez, Zhandarov y Mäder, respectivamente, aunque en esta parte de la investigación solamente se utilizó ese procedimiento para identificar el momento de rotura de la muestra y como garantía de que el proceso de arranque de la fibra haya sido el verdadero generador del dato que se obtuvo. Para la interpretación de los resultados se también se consultó otros métodos de evaluación vinculados a adhesivos y materiales compuestos [11, 12] o uniones adhesivas [13, 14].

Preparación de las muestras para el ensayo de desprendimiento a tracción

Para la preparación de las muestras del ensayo de desprendimiento a tracción se utilizó un dispositivo elaborado especialmente para pruebas de una sola fibra. Este consiste en una placa de aluminio de 145 mm x 120 mm, a la que se le construyeron 5 cavidades con un volumen de 250 mm³ cada una, para formar el bloque de polímero alrededor de la fibra. A dichas cavidades se les elaboraron ranuras de aproximadamente 0,8 mm de ancho para insertar cada muestra de fibra. En la parte superior de esa placa se colocó una pieza construida a partir de una chapa metálica conformada en la que quedan disponibles cinco asideros, exactamente encima de las 5 ranuras, lo que permite sostener, con una presión leve y alinear las cinco fibras en el proceso de fusión del polímero y posterior enfriamiento. En la parte superior del dispositivo se fijó un cilindro de aluminio con agujero pasante, el cual cumple las funciones de aro para el agarre y traslado, en el proceso de enfriamiento de la placa. En la foto se muestra el dispositivo en operación, para lo cual se le coloca una placa de aislante térmico en la parte superior del mismo. El enfriamiento se realiza por circulación de agua. Para eso, se apaga la placa calentadora, se retira el aislamiento térmico y el termopar colocado en la parte trasera del dispositivo, se toma el dispositivo por el agarre superior con pinzas apropiadas y se lleva al sitio de enfriamiento, cuidando que ningún espécimen haga contacto con el agua.



a) Colocación de las fibras y alineación

b) Forma de inserción del termopar, para el cierre del lazo de control de temperatura

Fig. 1. Dispositivo para preparación de las muestras del ensayo de desprendimiento a tracción

En la figura 2 se describe el ciclo de preparación de las muestras. En el último paso se hace un corte con un medio bien afilado, que puede ser un micrómetro. El corte debe dejar una superficie lisa, apta para observar al microscopio óptico y fotografiar la sección trasversal de las fibras. Se debe preparar un número de muestras no menor de diez en cada punto experimental, por dos razones: primero, el objetivo del ensayo es lograr el desprendimiento por lo que, si se observa que hay rotura en la mayoría de las fibras hay que hacer un nuevo corte en la parte anterior (repetir el último paso) hasta lograr que las muestras comiencen a romper por la interfase, segundo, puede haber muestras en que la cobertura de la fibra por la resina sea deficiente y deben ser descartadas. En la figura 3 puede verse las muestras después de haberseles efectuado el corte, último paso en la figura 2.

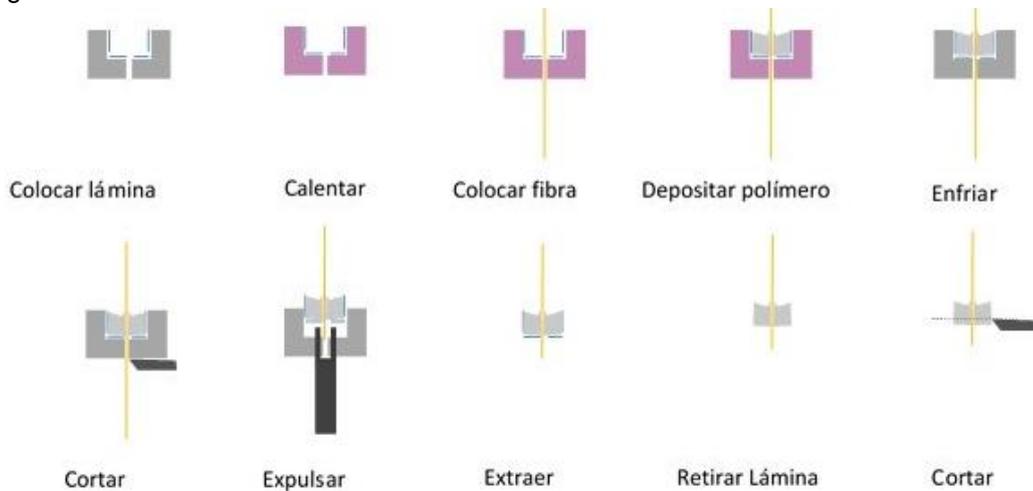


Fig. 2. Secuencia de preparación de los compuestos de una sola fibra para el ensayo de desprendimiento a tracción (se ejemplifica con una, lo que ocurre en las 5 cavidades del dispositivo)

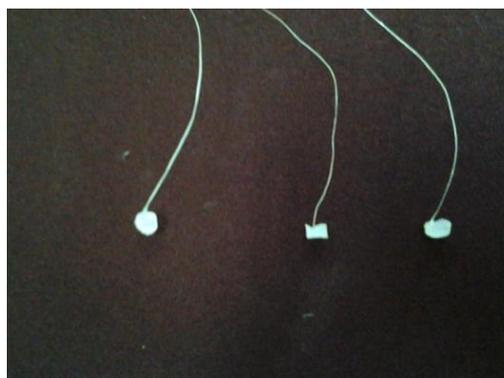


Fig. 3. Micro-compuestos de una sola fibra para el ensayo de desprendimiento a tracción

Medición del área y perímetro de la sección transversal

La medición del área de la sección transversal de la fibra y el perímetro puede realizarse por diversas vías. Hay microscopios ópticos que incorporan cámaras y software propio de procesamiento de imágenes que tienen incorporadas esas funciones, o cámaras digitales convencionales o CCD que se adquieren para incorporar a los microscopios ópticos convencionales y que igualmente son suministradas con el software por los fabricantes. En nuestro caso se consiguió fotografiar las muestras y un patrón con apreciación 0,01 mm y se hizo el post procesamiento de las fotos en una microcomputadora convencional utilizando el software Autodesk Inventor. Se pudo utilizar también el software Image J.

En la figura 4a se puede observar la sección de la muestra cortada y en la 4b la misma muestra en la que se delimitó el área de la fibra, como pasos iniciales del procesamiento digital. El propio software calcula el área y el perímetro que luego son escalados y procesados estadísticamente.

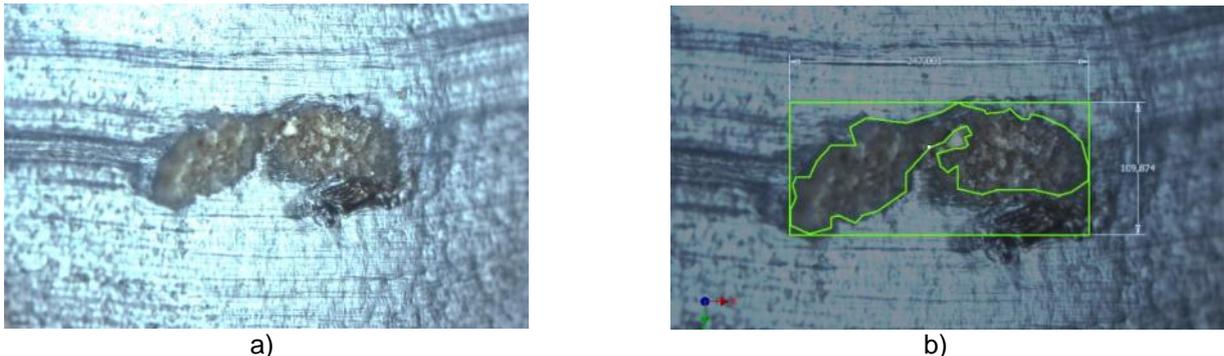


Fig. 4. Fotomicrografía digital de la sección transversal de una fibra incluida en la matriz. .a) Sin tratar .b) Con área de la fibra delimitada (El rectángulo exterior es solo para evaluar el factor de escala. El área medida es la incluida dentro del perímetro irregular).

Ensayo de las muestras por desprendimiento a tracción

Para continuar el proceso de evaluación del comportamiento de la interfase y antes de colocar cada muestra en la máquina de ensayos para su rotura, se midió la longitud de la fibra inmersa en el polímero (L en la expresión 3), utilizando el pie de rey. Se diseñó un dispositivo para sujetar convenientemente las muestras en el proceso de rotura. En la figura 5 puede observarse la forma del dispositivo y la alineación de la fibra respecto al eje de la máquina. El ensayo se efectuó con una velocidad de desplazamiento de la cruceta de 1 mm/min. Las condiciones del local fueron: Temperatura 25°C y humedad constante controlada del 60% tanto para el ensayo de desprendimiento como para el de resistencia de la fibra.



Fig. 5. Dispositivo para el ensayo de desprendimiento de la fibra a tracción colocado en las mordazas de la máquina universal.

Ensayo de resistencia a tracción de las fibras

Las fibras seleccionadas y clasificadas se colocaron en un dispositivo (ver Fig. 6) preparado garantizando los requisitos de alineación sugeridos por normas generales establecidas para el ensayo de materiales fibrosos y sus productos (ASTM C1557, ASTM D4268) [15,16] pero ajustándose a los requerimientos de este estudio. La velocidad de desplazamiento utilizada fue de 2 mm/min.



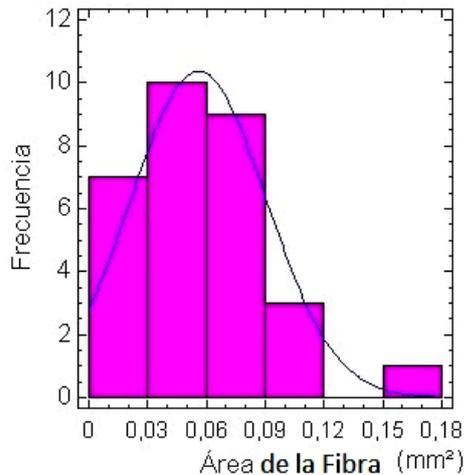
Fig. 6. Dispositivo para el ensayo de resistencia de la fibra

Resultados y Discusión

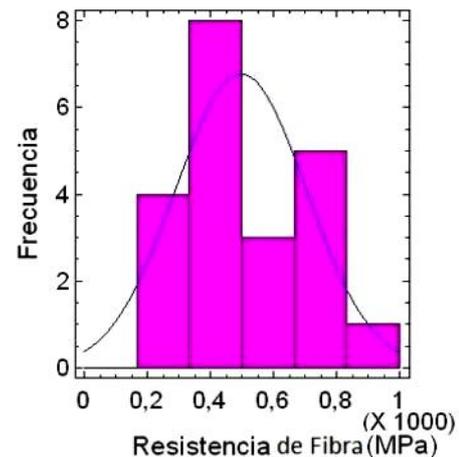
Morfología y resistencia de las fibras de henequén

El perímetro de la sección transversal de las fibras en la muestra estudiada varió entre 0,39 y 1,98mm. El área de la sección transversal de las fibras se comportó similar a lo reportado en la literatura aunque se observa un grupo de fibras minoritario que alcanza un área mayor a lo reportado en lo que constituye la cola del histograma de frecuencias. Esto puede deberse a las condiciones climáticas pero también al método de desfibrado. Se debe tener en cuenta que lo que se denomina fibras en este trabajo son en realidad haces fibrosos con un número variable de fibras y microfibrillas en su interior. Todos los haces tampoco son iguales ya que van cambiando su función, mayormente la tensión que reciben, de acuerdo a la posición que ocupan en la hoja y eso genera en el tejido vegetal una respuesta diferenciada en cuanto a desarrollo o grosor. La resistencia típica de la fibra de henequén de las plantaciones cubanas es de alrededor de 500Mpa (gráfico de la Fig. 7b), con una tendencia central y distribución similar a la reportada por otros autores [1] en referencia a fibras tomadas de plantaciones donde prevalecen las condiciones climáticas originarias de esta especie.

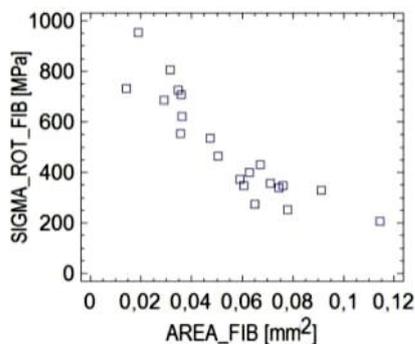
Como se observa en el gráfico de la figura 7c, es consistente la tendencia a la disminución de la resistencia de la fibra con el aumento de su sección transversal. Esto sugiere controlar la composición del tipo de fibra cuando se elaboren materiales que la obtengan a partir de un proceso previo de preparación que implique corte o molida y clasificación. La relación perímetro-área de sección es mayor para las fibras de menor sección, por lo que se prevé un mayor aporte de estas a la resistencia de los materiales que se preparen.



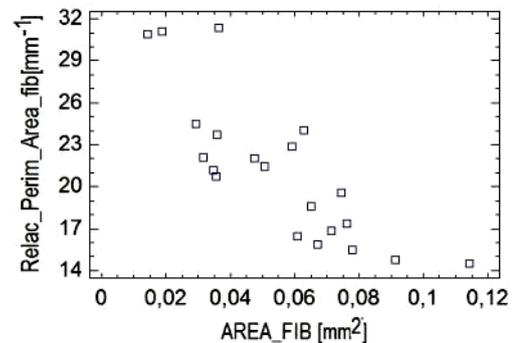
a) Histograma de frecuencia de área de la sección transversal de las fibras



b) Distribución de la resistencia de las fibras en la muestra estudiada



c) Relación entre la resistencia a la rotura de las fibras estudiadas y el área de su sección transversal

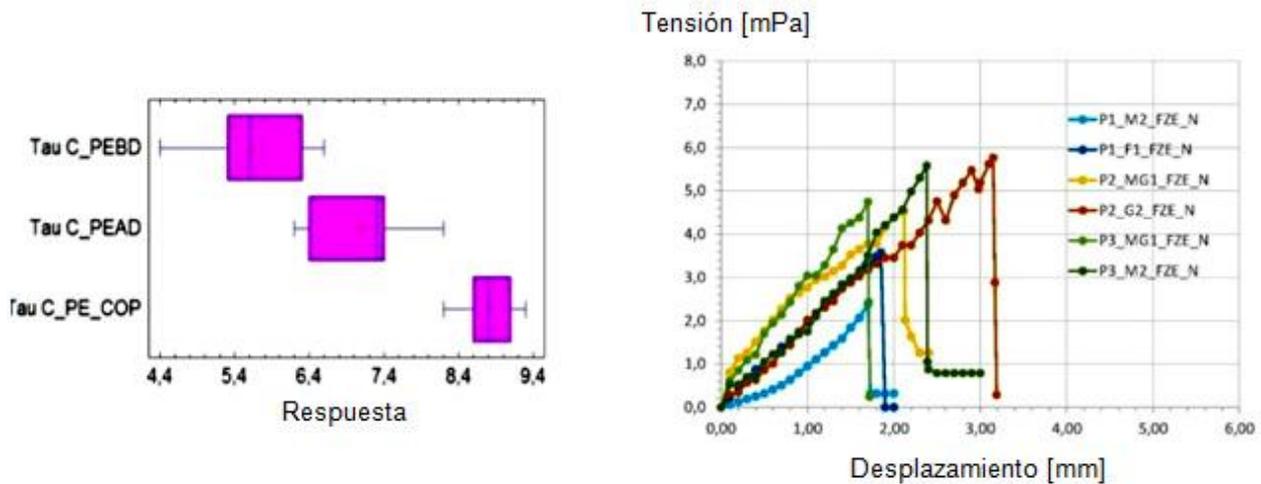


d) Comportamiento de la relación perímetro-área de sección transversal de las fibras para las distintas áreas de sección transversal de las fibras estudiadas

Fig. 7. Algunos parámetros geométricos y de resistencia de la fibra de henequén de plantaciones cubanas**Comportamiento mecánico de la Interfase de fibras de henequén y poliolefinas**

Los trabajos utilizados como referencia han propuesto seguir la rotura de la interfase a través del diagrama fuerza contra deformación. Toda vez que en este tipo de estudio se pueden generar muestras con áreas de interfase muy variables, se prefirió referir los valores del gráfico a dicha área, con lo que quedaría similar a un diagrama común de tensión tangencial contra deformación, en el que se dividen todos los valores de fuerza entre el área inicial (ver Fig. 8b). Al igual que en ese tipo de diagrama de tensión contra deformación, en estos diagramas de tensión tangencial en la interfase se tendrán zonas en las que hay que saber que el valor de las tensiones diferirá de las graficadas, como en la llamada cola, en la que ocurre el arrastre y extracción final de la fibra, en ese caso hay que continuar interpretando el gráfico con el mismo sentido que el de fuerza versus deformación. No obstante esta limitación, el efecto homogeneizador que tiene referir al área los valores de fuerza ayuda mucho, sobre todo cuando se trata de comparar los gráficos de un número grande de muestras, como es caso de este estudio. Se observa similitud cualitativa (ver gráfico de la Fig. 8b) entre los resultados obtenidos con PEBD (P1_M2 y P1_F1), PEAD (P2_MG1 y P2_G2) y el copolímero (P3_MG1 y P3_M2), especialmente en los mecanismos de rotura de la interfase ya que, entre otros factores que pueden incidir en la mejora de la interfase y que no se utilizaron, no se aplicó tratamiento alguno a la misma, como en otros trabajos que se reportan [1,6], tampoco era el objetivo de este trabajo. En cambio, se observa un incremento marcado en la adherencia reflejada en el valor de τ_c para el copolímero (ver Fig. 8a). El aspecto distintivo de este copolímero, respecto a las otras dos matrices utilizadas, radica en la fluidez: es un material que tiene una capacidad, apreciablemente superior a los otros dos utilizados, para copiar formas muy complejas una vez que es calentado hasta la temperatura de trabajo. Esto se ve reflejado en el gráfico de la figura 7a donde el copolímero (ver $\tau_{c_PE_COP}$) supera significativamente el valor de la adhesividad de los otros dos utilizados. Con las condiciones de tratamiento propuestas a las fibras en este estudio, el mecanismo de adhesión básico debe ser el agarre mecánico, independientemente de otros mecanismos que aún se encuentran en estudio, pero que fueron los mismos para todas las fibras utilizadas, en cambio, este incremento indica no perder de vista, en el proceso de diseño del material y su tecnología, la selección de la temperatura

óptima para poner en contacto el polímero con la fibra, temperatura a la que son más favorables las condiciones de humectabilidad para cada polímero termoplástico utilizado.



a) Resultado de la comparación estadística de la resistencia al corte interfacial para cada par fibra - polímero (F-P) estudiado

b) Comportamiento mecánica de la interfase seguido a través del diagrama tensión contra deformación para algunas muestras representativas de cada par F-P

Fig. 8. Resistencia al corte interfacial

Utilizando la ecuación 4 y evaluando los datos experimentales obtenidos en este estudio se puede afirmar que, trabajando con las matrices estudiadas, la longitud crítica, para incorporación dentro del material compuesto va desde alrededor de 4,46 mm, para las fibras más finas medidas y el polímero con mejor comportamiento en la interfase, hasta 6 mm para las fibras más gruesas medidas y el polímero con peor comportamiento en la interfase. Para fibras con una resistencia igual a la típica, la mayor parte según el histograma de la figura 7b (500 Mpa), el polímero con peor comportamiento en la interfase y la fibra con área de sección transversal más frecuente (0,06 mm²) (ver Fig. 7a), la longitud crítica para incorporación en el material compuesto es de 8,1 mm.

Algunos procesos reportados de tratamiento superficial de las fibras [1], tienden a dañarlas y a brindar interfaces con propiedades similares a las obtenidas sin tratamiento o incluso menores, además brindan incrementos poco apreciables con el uso de reactivos que deben ser objeto de valoración económica para su introducción en grandes volúmenes de producción y no son coherentes con las cadenas productivas de muchas de las localidades o países donde se producen estas fibras por lo que en ese sentido el campo de investigación aún está abierto.

Conclusiones

Las fibras de henequén de plantas cultivadas en las condiciones del clima húmedo de Cuba presentan iguales propiedades a las cosechadas en otras regiones climáticas. Los procesos de corte y desfibrado empleados no han deteriorado esas propiedades.

Las fibras de henequén, vinculadas a poliolefinas en uso actualmente, pueden aportar valores de resistencia al corte interfacial entre 5,6 y 8,4 MPa, en dependencia de la fluidez del polímero escogido y su temperatura de moldeo, entre otros factores. Para las condiciones descritas en este estudio, con longitudes de fibra de menos de 10 mm puede comenzar a aprovecharse la resistencia de la misma en aplicaciones con solicitaciones simples pero en piezas que pueden tener forma compleja, para las que se utiliza mayormente el método de inyección.

Referencias

- Valadez A, Cervantes JM, Olayo R, et al. Effect of fiber treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. *Composites: Part B*. 1999;30:309-20. ISSN 1359-8368.
- Ayora MH, Ríos CR, Márquez A. Compuestos de 'PVC'-henequén. Evaluación de las propiedades de flujo utilizando un reómetro de par de torsión 1996. *IMIQ, Tecnología ciencia y educación*. 1996;11(1-2):35-41. ISSN. 2444-2887
- Sanjuan RJ, Jasso CF. Efecto de la fibra de agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2009;8(3):319-27. ISSN 2395-8472.
- Bermello A, Díaz D, Martínez R. Estudio de un material compuesto de partículas de bagazo de caña y matriz de polietileno mediante espectrometría FTIR. *Revista ICIDCA*. 2008;XLII (1-3). ISSN 0318-6204.
- Morales AB, Victoria D, Ponce ME, et al. Materiales reforzados con poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 2011;12(4):255-67. ISSN 1988-4206.

6. Zhandarov S, Mäder E. An alternative method of determining the local interfacial shear strength from force–displacement curves in the pull-out and microbond tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2014;55(7):37-42. ISSN 0143-7496. DOI j.ijadhadh.2014.07.006.
7. Monteiro SN. Ensaíos de Pullout em Fibras Lignocelulósicas – Uma Metodologia de Análise. *Revista Matéria*. 2006;11(3):189-96. ISSN 1517-7076.
8. Avella M, Avolio R, Bonadies I, et al. Effect of compatibilization on thermal degradation kinetics of HDPE-based composites containing cellulose reinforcements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2010. ISSN 1588-2926 DOI 10.1007/s10973-010-0836-3.
9. Fang Y, Wang Q, Bai X, et al. Thermal and burning properties of wood flour-poly(vinyl chloride) composite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011. ISSN 1588-2926 DOI 10.1007/s10973-011-2071-y.
10. Gupta AK, Biswal M, Mohanty S. Mechanical, Thermal Degradation and Flammability Studies on Surface Modified sisal Fiber Reinforced Recycled Polypropylene Composites. *Advances in Mechanical Engineering*. 2012;2012:1-13. ISSN 1687-8140. DOI 10.1155/2012/418031.
11. Teixeira S, Sinke J. Test method to assess interface adhesion in composite bonding. *Applied Adhesion Science*. 2015;3(9):1-13. ISSN 2196-4351. DOI 10.1186/s40563-015-0033-5.
12. Simon F, Legrand G. Overview of European Standards for Adhesives Used in Wood-Based Products. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010;24:1611-27. ISSN 1568-5616. DOI 10.1163/016942410X507722.
13. Standfest G, Kranzer S, Petutschnigg A, et al. Determination of the Microstructure of an Adhesive-Bonded Medium Density Fiberboard (MDF) using 3-D Sub-micrometer Computer Tomography. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010;24:1501–14. ISSN 1568-5616. DOI 10.1163/016942410X501052.
14. Prajer M, Ansell MP. Observation of transcrystalline growth of PLA crystals on sisal fibre bundles and the effect of crystal structure on interfacial shear strength. *Composite Interfaces*. 2012;19(1):39-50. ISSN. 1568-5543 DOI 10.1080/09276440.2012.688398.
15. American Society for Testing Materials. ASTM. Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. ASTM C1557-03. West Conshohocken, PA, United States: ASTM. 2003.
16. American Society for Testing Materials. ASTM Standard Test Methods for testing Fiber Ropes. ASTM D4268-93. West Conshohocken, PA, United States: ASTM. 1993.