

UTILIZACIÓN DE LAS FIBRAS DEL RASTROJO DE PIÑA (*Ananas comusus*, variedad *champaka*) COMO MATERIAL DE REFUERZO EN RESINAS DE POLIÉSTER

Karol Quesada-Solís¹, Patricia Alvarado-Aguilar¹, Rosario Sibaja-Ballester¹, José Vega-Baudrit²

¹) Laboratorio de Polímeros-POLIUNA, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

²) Laboratorio de Adhesión y Adhesivos, Universidad de Alicante, España. Correo electrónico: jvegab@hotmail.com

RESUMEN

En los últimos años, ha surgido un particular interés por el desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras naturales, como consecuencia de las ventajas técnicas, económicas y ambientales que presentan. En este estudio se evaluó el grado de reforzamiento de las fibras de rastrojo de piña sin tratamiento, en una matriz de resina poliéster no saturado de uso comercial.

Se prepararon materiales compuestos con fibra de distinta longitud, y con diferente porcentaje de la misma. Se evaluaron sus propiedades a través de la densidad, resistencia a la ruptura por tensión, flexión y energía de impacto. De estas propiedades se observó una mejora en la resistencia a la ruptura por tensión, con valores cercanos a los 20 MPa.

El análisis de la interfase entre la fibra y la matriz por microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló que no existe una buena adhesión entre la fibra y la matriz. Sin embargo, se encontró que esta adhesión puede ser incrementada por el aumento en la presión de moldeo durante la preparación del material, según lo mostrado las fotografías de la superficie de fractura de estos materiales compuestos.

Palabras claves: Materiales compuestos, rastrojo de piña, microscopía electrónica de barrido (SEM), fibra, matriz, módulo de Young.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la industrialización de los productos agrícolas genera un 86% del total de desechos de los sectores industriales. La utilización de estos residuos como una fuente alternativa de materiales de mayor valor agregado, resultaría ventajosa desde el punto de vista económico y ambiental (Moya, 2001).

Los principales desechos agrícolas provienen de la industrialización de productos tradicionales como café y banano; y los no tradicionales como la piña y la naranja. El caso de la piña, su exportación alcanzó un orden de magnitud de 10^5 toneladas para el año 2003. Para el 2007, se proyecta una exportación de 70 millones de cajas de 12 kilos (Barquero, 2004).

Los desechos de la industrialización de la piña constituyen hasta el 65% del fruto. Además de la corona (parte superior del fruto), el corazón y las cáscaras, se genera el rastrojo, el cual corresponde al material vegetal de la planta y se elimina después del ciclo comercial. Se ha determinado que, por hectárea de piña cultivada, se genera cerca de 300 TM de rastrojo. Considerando que en el país hay aproximadamente 9.000 hectáreas cultivadas, el total desechado correspondería a 2 millones de TM por año (Araya, 1998).

Para la eliminación de los desechos de rastrojo, debido su volumen y a su lenta degradación, se recurre al uso de herbicidas tóxicos como el dicloruro de dimetil-4,4'-bipiridilo (Paraquat), que lo deseca y finalmente se incinera. La toxicidad del Paraquat es acumulativa, contamina los suelos, amenazando su uso futuro e incluso al mismo mercado de la piña (Araya 1998). El aprovechamiento de las fibras de rastrojo de piña en materiales compuestos, es una alternativa a las prácticas de eliminación de estos desechos.

En años recientes, el uso de fibras naturales en diversas áreas ha surgido con gran fuerza. Entre las principales razones se tiene la disponibilidad, diversidad y renovabilidad de las fibras, así como el bajo consumo energético en su fabricación, los costos competitivos y su baja densidad. En el área de polímeros, la implementación de fibras naturales como refuerzos, tiene como principales inconvenientes su carácter hidrófilo, su baja estabilidad dimensional y térmica, su degradabilidad en presencia de microorganismos, la luz ultravioleta, ácidos y bases fuertes y la tendencia a la inflamabilidad (Gómez, 1998).

Se ha trabajado en la evaluación de fibras de aserrín de pino como alternativa para reforzar polietileno de alta densidad (Rodríguez, 2000). Asimismo, se han utilizado las fibras naturales del henequén, coco, cuero, entre otras, para el reforzamiento de polímeros termoplásticos (CICY, 2002) y de fibras de palma de yuca y henequén como de refuerzo para resinas poliéster entrecruzadas con estireno o acrilato de butilo. George y colaboradores estudiaron materiales compuestos de polietileno de baja densidad reforzado con fibras de hoja de piña (George *et al.*, 1998).

En materiales compuestos de poliéster se prefieren las fibras naturales, debido a su bajo costo y densidad respecto a los obtenidos con fibras de carbono y de vidrio (Gómez, 1998). En Costa Rica, el Laboratorio de Polímeros de la Universidad Nacional –POLIUNA, realizó estudios comparativos entre los poliésteres comerciales reforzados con fibras de vidrio y los reforzados con fibras naturales de raquis de banano, evaluando algunas propiedades mecánicas y fisicoquímicas de los productos obtenidos (POLIUNA, 1999).

Investigaciones recientes (Jasso, 2000; Nabi, 1999; Arribas, 2001; Bledzki, 1999), indican que el campo de los materiales compuestos de matriz polimérica se orienta hacia la utilización de fibras naturales como refuerzos. Lo anterior se debe a las desventajas asociadas a la utilización de la fibra de vidrio u otras fibras sintéticas tales como la abrasión en equipos, altos costos energéticos y la dificultad para su reciclaje.

Existen muchas variedades de fibras naturales y formas de clasificarlas. Una de las clasificaciones se refiere al lugar de su procedencia; se habla entonces de fibras largas (duras o blandas) provenientes de parte del sistema vascular de las hojas y del tallo de la planta. Las fibras cortas provenientes de semillas o frutos, y las fibras misceláneas provenientes de otras regiones de la planta (Gómez, 1998). De los grupos de fibras naturales, de acuerdo a su origen y propiedades, el más utilizado como refuerzo es el de fibras duras y de estas, el sisal, abaca, henequén y coco representan el 90% del volumen total empleado (Arribas *et al.*, 2001). Según Kuruvilla, fibras lignocelulósicas como el yute, sisal y piña han sido usadas como refuerzos en matrices termoestables (Kuruvilla, 1993).

Mediante modificaciones de la relación de resina a monómero entrecruzante, así como la utilización de diferentes tipos de monómeros entrecruzantes, Jasso ha estudiado los

diferentes formas para obtener materiales reforzados basados en resina poliéster no saturada como son el mezclado físico con diferentes tipos de rellenos y el uso de diferentes tipos de materiales reforzantes, incluyendo fibras celulósicas naturales (Jasso, 2000).

Las propiedades mecánicas de este tipo de materiales compuestos se pueden modificar de varias maneras: seleccionando el material matriz de mejor tenacidad, mejorando la interfase entre los componentes, orientando y mejorando la dispersión de las fibras, mejorando la relación de aspecto (relación longitud/diámetro) de las fibras de refuerzo, optimizando el tamaño de fibra y el porcentaje de composición de cada material (Rodríguez, 2000).

El presente trabajo valora la elaboración de materiales compuestos poliméricos a partir de una resina poliéster comercial y fibras de rastrojo de piña, fundamentado en la evaluación, no sólo de variables como el porcentaje y longitud de las fibras, sino también a través de la caracterización de la interfase fibra/ matriz por medio de un análisis de superficie de fractura. Esto permite relacionar propiedades mecánicas, físicas y morfológicas del material, de acuerdo al tipo de unión fibra - matriz existente para explicar el grado de reforzamiento del material.

PARTE EXPERIMENTAL

Sustrato natural: El rastrojo de piña fue suministrado por la compañía productora de piña Collen Street Bakery, ubicada en la Zona Norte de Costa Rica. La variedad de piña utilizada fue la (champaka). Se secó en un secador solar y se molió (molino de martillos Seisakusho Co., Ltd., tipo 1029-B). Se tamizó (Tamizador W. S. Tyler Incorporated, tipo Sieve Shaker, modelo Rx-86) y se clasificó en diferentes tamaños de fibra (0,125 a 2,000 mm).

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUSTRATO

Cenizas: se realizó siguiendo la norma ASTM D 1102-56 a una temperatura de 500°C.

Humedad: se realizó en una balanza de humedad O'haus (Vega, 1994).

Solubilidad en agua fría: se realizó siguiendo la norma ASTM D 1110-56.

Solubilidad en agua caliente: se realizó siguiendo la norma ASTM D 1110-56.

Solubilidad en ciclohexano/etanol: se realizó bajo la norma ASTM D1107-56 modificada por la sustitución del benceno por ciclohexano.

Determinación del contenido de holocelulosa: se realizó bajo la norma ASTM D 1104-56.

Determinación del contenido de lignina: se realizó bajo la norma ASTM D1106-56.

Determinación de α -celulosa: se realizó bajo la norma ASTM D 1103-60

Diámetro de fibra: el rastrojo se cortó en tiras de 1 cm de ancho y se colocó en un recipiente de vidrio. Se añadieron 600 mL de reactivo aceto-nítrico (ácido acético 80% y ácido nítrico concentrado 10:1), y se mantuvieron en esa solución hasta que las fibras se soltaran. Se lavó el material y se coloreó con safranina (2% en etanol). Una vez separadas las fibras se realizaron las mediciones del diámetro utilizando un microscopio (Microscopio óptico Labourlux con micrómetro ocular adaptado). Se realizaron 100 mediciones de diámetro a lo largo de varias de las fibras analizadas. Para esto se utilizó un micrómetro ocular 10x calibrado, en el que hay 11,58 μm por cada división (Ramírez, 1996).

Obtención de poliéster: Se utilizó una resina poliéster insaturada Polyser 3000-1; monómero de estireno y peróxido de metiletilcetona como catalizador (calidad industrial). La reacción y curado de los poliésteres se realizó a temperatura ambiente. Se obtuvieron materiales compuestos, con diferentes longitudes de fibra, y se realizaron variaciones en el contenido en masa de la fibra. Además se prepararon muestras del poliéster sin adicionarle fibra como patrón comparativo.

Obtención de láminas de prueba de un poliéster sin refuerzo. En un recipiente plástico se midió la masa necesaria de resina de acuerdo al tamaño final deseado de la lámina (para una lámina de 10 cm x 10 cm se requieren 64 g de resina, 6 g de estireno y 28 gotas de catalizador). Se agregó el estireno y se mezcló bien con un agitador de vidrio. Se agregó el catalizador y se mezcló rápidamente. La mezcla se vertió sobre el molde y se dejó curar por un período de dos horas a temperatura ambiente.

Obtención de láminas de prueba de poliésteres reforzados con contenido de fibra constante. En un recipiente plástico se midió la masa de resina, se agregó el estireno y se mezclaron bien con un agitador de vidrio, luego se agregó el catalizador y se mezcló rápidamente. Seguidamente se agregó la cantidad de fibra (10% masa) (para una lámina de 10 cm x 10 cm se requieren 64 g de resina, 6 g de estireno, 28 gotas de catalizador y 6 g de fibra) para cada una de las longitudes de fibra que se trabajaron: 0,425 mm, 0,500 mm, 1,000 mm y 1,400 mm.

La mezcla se vertió sobre el molde, se ejerció presión sobre el material con una pesa de 5 kg y se dejó curar por un período de dos horas.

Obtención de láminas de prueba de poliésteres reforzados con contenido de fibra variable. Se pesaron las cantidades correspondientes de reactivos según la formulación mencionada. Se trabajaron porcentajes en masa de fibra de 5, 10, 15 y 20%, manteniendo una longitud de fibra constante. La mezcla se vertió sobre el molde, se ejerció presión sobre el material con una pesa de 5 kg y se dejó curar por un período de dos horas.

Obtención de láminas de prueba de poliésteres reforzados a diferentes presiones de moldeo. Para evaluar el efecto de la presión de moldeo, se elaboraron láminas siguiendo las indicaciones mencionadas. Además de la pesa de 5 kg, se colocaron otras de 10 y 15 kg, para poliésteres con un contenido de fibras del 10% y una longitud de fibra de 1 mm.

Evaluación de las propiedades físicas de los poliésteres obtenidos.

- Densidad: Las muestras se pesaron y se midieron las dimensiones de cada una. Luego se obtuvo la relación de masa/ volumen para determinar la densidad aparente. Se tomaron tres muestras de cada material y a cada una se le realizaron diez mediciones.
- Propiedades mecánicas: Resistencia a la ruptura por tensión: se realizó según la norma de “Propiedades de tensión de plásticos” (ASTM D 638 y ASTM D 882). Se empleó un analizador mecánico universal (Tensilon RTH -100 Orientec Corporation): velocidad de máquina de 100 mm/min, carga del 100 % y separación inicial de prensas de 50 mm.

- Resistencia a la flexión: El ensayo de flexión en tres puntos se realiza según la norma “Propiedades de flexión de plásticos no reforzados, reforzados” (ASTM D 790-86) mediante un Analizador mecánico universal (Tensilon RTH -100 Orientec Corporation).
- Resistencia al impacto Izod: se evaluó utilizando un analizador de impacto (Custom Scientific Instruments CS) según norma “Resistencia al impacto de los plásticos con un analizador de péndulo”, ensayo Izod ASTM D 256.
- Estudio de la superficie de fractura por Microscopía electrónica de barrido (SEM): Se utilizaron las muestras fracturadas en el análisis de ruptura por tensión. Se analizaron materiales compuestos preparados al 10% en contenido de fibra de 1 mm de longitud; una con presión y otra sin presión. Se utilizó un microscopio electrónico modelo Hitachi S-570, perteneciente al Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas de la Universidad de Costa Rica CIEMIC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de la fibra. Las fibras son los componentes resistentes en un material reforzado con ellas, definen la mayor parte de las características mecánicas del material y por ende son parte importante para definir la aplicación final que se le puede dar al mismo. Así, al trabajar con materiales compuestos reforzados con fibras lignocelulósicas, uno de los primeros pasos a seguir es la caracterización de las fibras a utilizar. Se debe considerar, al trabajar con materiales de origen natural, que gran parte de las propiedades de las fibras se ven influenciadas por aspectos como la variedad de la planta, el clima, la altitud y las condiciones de las zonas de cultivo.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica de las fibras de rastrojo de piña obtenidas.

El valor obtenido en el porcentaje de cenizas es alto debido a las prácticas de cultivo de estas especies, además que los suelos son ricos en materiales inorgánicos. El rastrojo presenta una baja solubilidad en extracto ciclohexano/ etanol. La solubilidad en agua fría y

agua caliente es alta debido probablemente a los azúcares, almidones, colorantes, ceras y sales inorgánicas que posee la fibra; resultados similares fueron en investigaciones previas (Araya, 1998; Vega, 1994). Los resultados obtenidos para el contenido de holocelulosa y lignina son de magnitudes similares a los reportados para otras especies no maderables como bagazo, tallo de algodón, paja de arroz (Mohammad, 2003) al utilizar estas fibras en materiales compuestos de poliéster.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del rastrojo de piña en base seca.

Ensayo	Resultado (%)
Cenizas	4,60 ± 0,01
Humedad	13,5 ± 0,2
Solubilidad en agua caliente	38,45 ± 0,02
Solubilidad en agua fría	36,90 ± 0,02
Extractos ciclohexano/ etanol	8,74 ± 0,01
Holocelulosa	42,70 ± 0,01
Lignina	27,72 ± 0,01
Alfa-celulosa	45,12 ± 0,02

La preparación de las fibras para la elaboración de los materiales compuestos fue mediante la reducción de tamaño por métodos mecánicos; éste es un factor a considerar en las propiedades de los productos obtenidos ya que además de las características morfológicas, físicas y químicas de la materia prima utilizada, las propiedades de los materiales a base de fibras celulósicas dependen de los métodos de extracción y procesamiento empleado. Se menciona en la literatura que de todas estas características es esencial considerar la longitud de fibra, el espesor, la fragmentación de la fibra como resultado del proceso de extracción empleado, el grado de polimerización, contenido de hemicelulosa y lignina residual (Ramírez, 1996).

Se determinó que el diámetro promedio de la fibra extraída por métodos químicos va desde $75 \pm 6 \mu\text{m}$ hasta $140 \pm 6 \mu\text{m}$ aproximadamente. Estos valores son similares a los mencionados en la literatura (George et al., 1998), utilizando fibras de hoja de piña con un

diámetro de fibra entre 50 y 150 μm para utilizarlas como refuerzo de una matriz de polietileno.

Propiedades de la matriz polimérica. Junto a la fibra de refuerzo, la matriz es el segundo componente de un material reforzado, la cual permite la transmisión de esfuerzos a las fibras, le da estabilidad al material y protege a las fibras de agentes externos (humedad, ataque químico). En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para las principales propiedades mecánicas y físicas de la resina poliéster utilizada.

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de la matriz de la resina poliéster.

Ensayo	Valor
Densidad aparente (g/cm^3)	$1,19 \pm 0,01$
Fuerza de tensión (Mpa)	$16,1 \pm 0,5$
Módulo de Young (MPa)	89 ± 6
Fuerza de flexión (MPa)	$122,4 \pm 0,3$
Energía de impacto (J/m)	9 ± 1

La resina comercial utilizada tiene una resistencia a la flexión comparable a la reportada en la literatura para resinas de poliéster trabajadas en condiciones similares. Sin embargo, las propiedades de tensión e impacto son más bajas, por lo que el estudio de su reforzamiento con fibras naturales es interesante.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Efecto del contenido de fibra sobre la densidad. La densidad de los materiales compuestos con fibras lignocelulósicas es una característica importante que determina en parte su aplicación final. La Figura 1 muestra la gráfica correspondiente a la variación de la densidad del material compuesto en función del contenido de fibra en masa para una longitud de fibra de 1 mm. A bajos porcentajes de fibra se observa que no existe una variación

considerable en la densidad. A partir de un contenido del 20% de fibra en masa se observa una mayor variación.

Valores similares de densidad fueron reportados por Zhu para la matriz de resina poliéster ($1,19 \text{ g/cm}^3$). También observó una disminución de la densidad al aumentar el contenido de fibra de banano como refuerzo, de 1,17 hasta $1,05 \text{ g/cm}^3$ para una variación en el contenido de fibra de 18 a 30 % (Zhu, 1995).

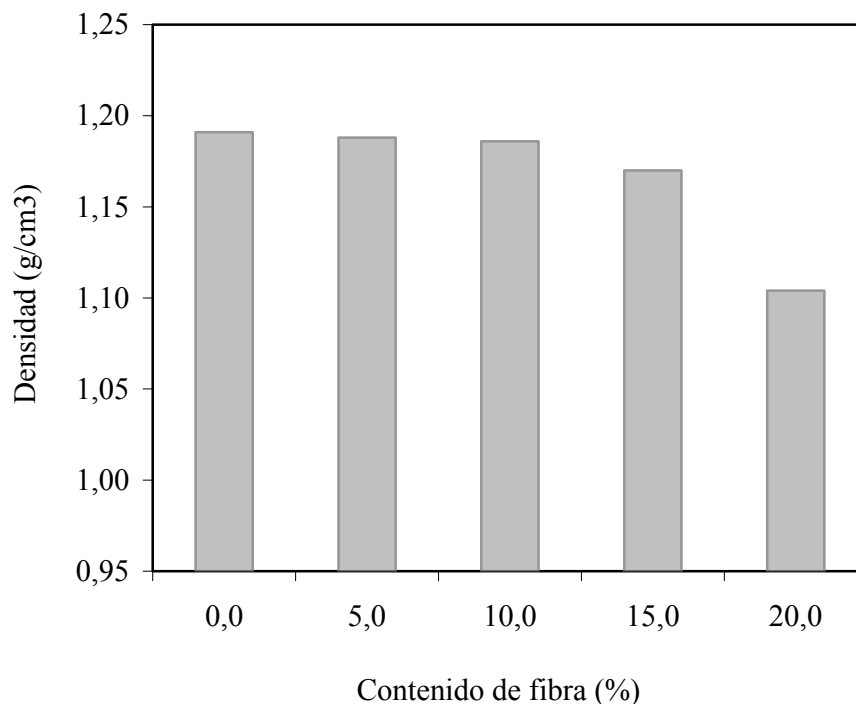


Figura 1. Variación de la densidad de los materiales compuestos con el porcentaje de fibra a una longitud de fibra de 1mm.

Efecto de la longitud de fibra sobre la resistencia a la ruptura. El grado de reforzamiento obtenido con la introducción de fibras de rastrojo de piña en la matriz de resina poliéster puede ser analizado por la fuerza de resistencia a la ruptura por tensión presentada por el material compuesto (Figuras 2 y 3). La Figura 2 muestra el gráfico de resistencia a ruptura del material compuesto a diferentes longitudes de fibra, para un contenido constante de fibra del 10%. Se puede observar que la resistencia a la ruptura pasa por un máximo a tamaños cercanos a 1 mm y luego disminuye; siendo la longitud promedio de fibra de 1 mm la que le da al material mejores propiedades.

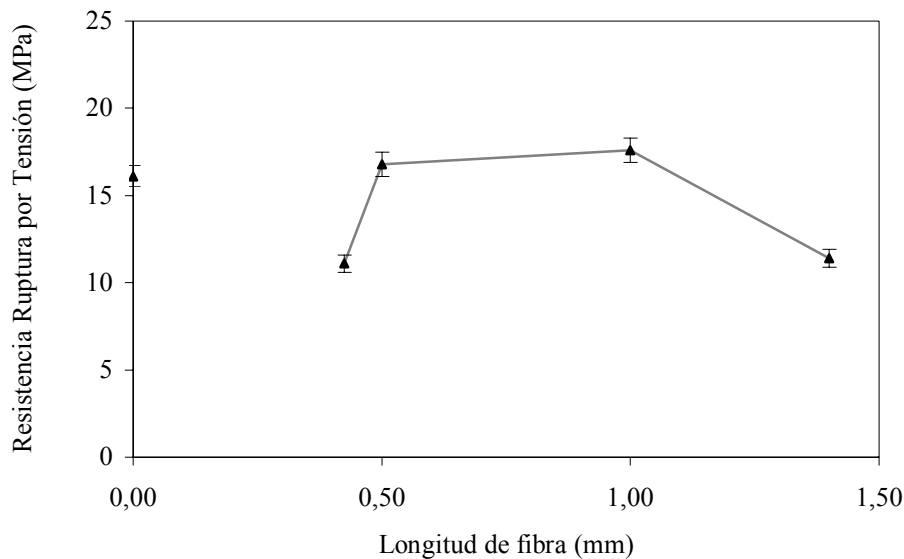


Figura 2. Relación de la resistencia a la ruptura con la longitud de fibra para poliésteres con contenido de 10% de fibra.

El mayor o menor reforzamiento que da una longitud de fibra determinada, puede ser explicado si se considera el concepto de longitud óptima de fibra (Arroyo, 1995). A longitudes de fibra menores a la longitud óptima de refuerzo, la transferencia de esfuerzo de la matriz a las fibras es mucho menor; y en el caso de longitudes mayores, la transferencia de esfuerzo es insuficiente debido a las mayores interacciones fibra con fibra.

Por lo anterior, se seleccionó la longitud de fibra de 1 mm como la longitud de fibra a utilizar para preparar las muestras que se usaron en los análisis de flexión e impacto para evaluar el efecto del contenido de fibra sobre estas propiedades trabajando a una longitud de fibra constante.

Efecto del contenido de fibra sobre la resistencia a la ruptura por tensión.

La resistencia a la ruptura por tensión de muestras obtenidas, es también dependiente del contenido de fibra (Figura 3), para los materiales analizados con una longitud de fibra constante de 1 mm, esta propiedad tiene un leve incremento con un contenido de 10% pero a mayores porcentajes disminuyen las propiedades de tensión del material compuesto. El valor obtenido de $17,6 \pm 0,4$ MPa no es sustancialmente mayor al de la matriz sin refuerzo $16,1 \pm 0,4$ MPa.

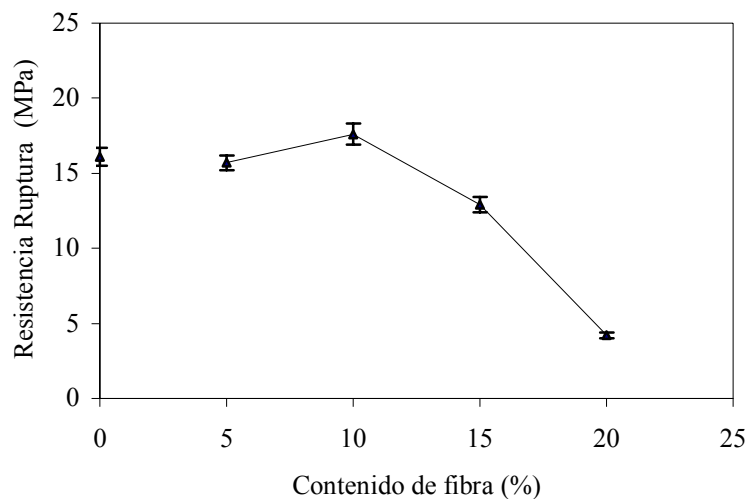


Figura 3. Relación de la resistencia a la ruptura con el porcentaje de fibra para poliésteres con longitud de fibra de 1 mm.

Lo anterior puede explicarse debido que a concentraciones de fibra superiores al 10%, se pueden presentar problemas en la dispersión de las fibras e interacciones fibra con fibra. Además, Pothan y colaboradores mencionan que los extremos de las fibras actúan como generadores de concentración de esfuerzos, los cuales podrían generar micro grietas que rompen el material al ser sometidos a un esfuerzo (Pothan et al., 1997).

La resistencia a la ruptura máxima (17,6 MPa) con un 10% de fibra en masa presentada por los materiales reforzados con el rastrojo de piña es comparable con la resistencia encontrada por otros investigadores (Jasso et al., 2000) para materiales a base de resina poliéster reforzados con fibras de henequén sin tratamiento (20,0 MPa) para un 28% de fibra en masa y con fibras de palma (13,3 MPa) para un 26% de fibra en masa.

Efecto del contenido de fibra sobre resistencia a la flexión en tres puntos y deformación del material. En la Figura 4 se muestra el comportamiento de los materiales compuestos de piña-poliéster bajo fuerzas de flexión y diferentes contenidos de fibra. De los resultados obtenidos, se observa una disminución en la tensión máxima de flexión que presentan estos materiales con respecto a la matriz de poliéster ($122,4 \pm 0,3$ MPa).

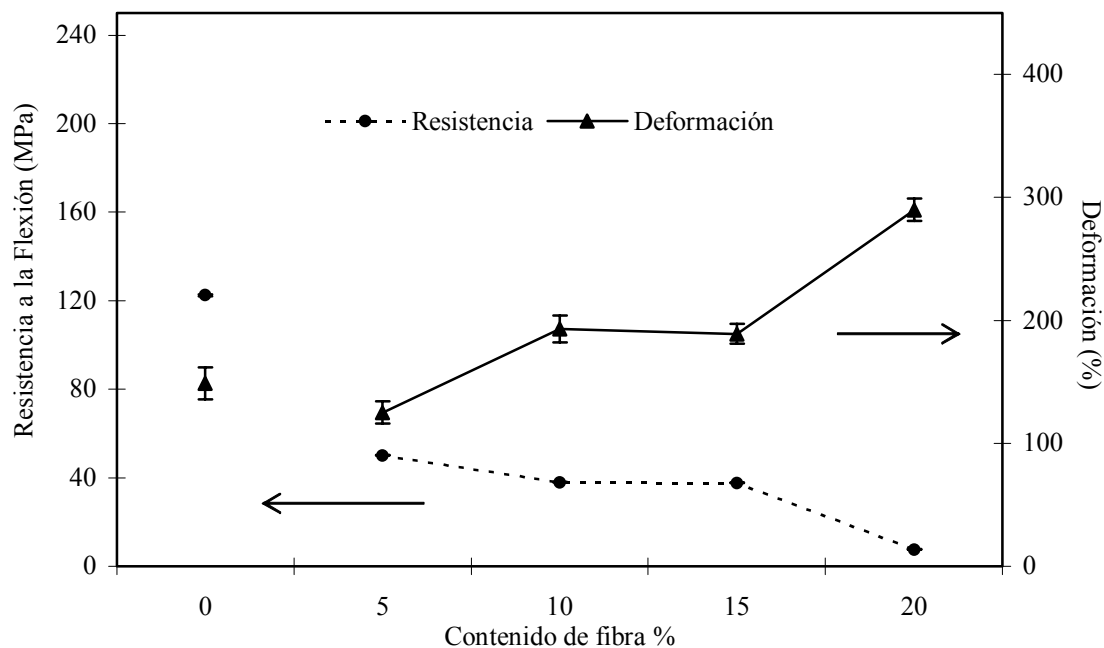


Figura 4. Relación de la resistencia a la flexión y porcentaje de deformación con el porcentaje de fibra para poliésteres con longitud de fibra de 1 mm.

Sin embargo, la capacidad del mismo para resistir una carga en términos de deformación antes de romperse va en aumento conforme aumenta el contenido de fibra, lo cual puede ser una propiedad importante en la aplicación final de un producto de este tipo.

En general los materiales compuestos elaborados presentan valores de resistencia a la flexión más bajos comparados con otros materiales compuestos de resina poliéster. Otros investigadores reportan (Zhu, 1995) valores que van desde 28,2 hasta 97,3 MPa para materiales compuestos de resina poliéster y fibra de banano sin tratamiento con diferentes contenidos de fibra.

Efecto del contenido de fibra sobre la resistencia al impacto Izod. A diferencia de los análisis de tensión y flexión, los ensayos de impacto son ensayos de fractura a elevada velocidad en los que se comunica a una probeta de material una importante cantidad de energía de forma puntual e instantánea con el fin de provocar su ruptura, determinándose la energía necesaria para ello (Collar, 1996).

Es importante destacar que la resistencia al impacto no es una propiedad mecánica perfectamente definida, como lo es el módulo de Young o la tensión de fluencia, que

constituyen propiedades intrínsecas del material. El uso de geometría estándar como Charpy o Izod provoca una severa limitación sobre la cantidad de información realmente útil que se puede obtener de los materiales (Frontini, 2000). El comportamiento a la fractura dependerá del nivel de tensiones aplicado, presencia de defectos, propiedades del material y de los mecanismos mediante los cuales la fractura proceda hasta completarse.

La figura 5 muestra el efecto del contenido de fibra sobre la energía de impacto de los materiales compuestos estudiados; para una longitud de fibra de 1 mm. La energía de impacto aumenta con el incremento del contenido de fibra, hasta llegar a un contenido máximo de 15%, en el cual se presentó el valor más alto de resistencia (8 ± 1 J/m), comparable con el de la resina sin adición de fibra (9 ± 1 J/m), es decir, no se observó un efecto reforzante de la fibra. Lo anterior se debe principalmente a que existe una débil unión entre la fibra y la matriz por lo que no se consume energía en la rotura de las fibras que haga que aumente la energía de impacto del material.

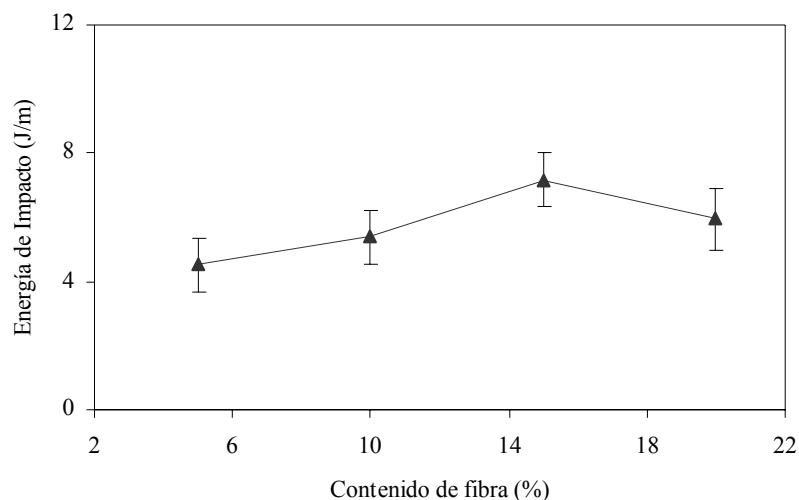


Figura 5. Relación de la energía de impacto con el porcentaje de fibra para poliésteres con longitud de fibra de 1 mm.

El ensayo de resistencia al impacto ha sido utilizado para estudiar materiales compuestos de poliéster con fibras de hoja de piña (Devi et al., 1996), fibras de yute sin tratamiento (O'Dell, 1997), donde se reporta valores de 32,5 J/m para la energía de impacto, valor muy superior al obtenido para los materiales compuestos de resina poliéster y fibras de rastrojo de piña estudiados.

Efecto de la presión de moldeo sobre la resistencia a la ruptura y el módulo de Young.

Debido a que no se observó un efecto reforzante considerable en las condiciones utilizadas se procedió a preparar probetas utilizando diferentes presiones de moldeo. En la Figura 6 se observa el efecto de la presión de moldeo sobre propiedades como la resistencia a la ruptura y el módulo de Young.

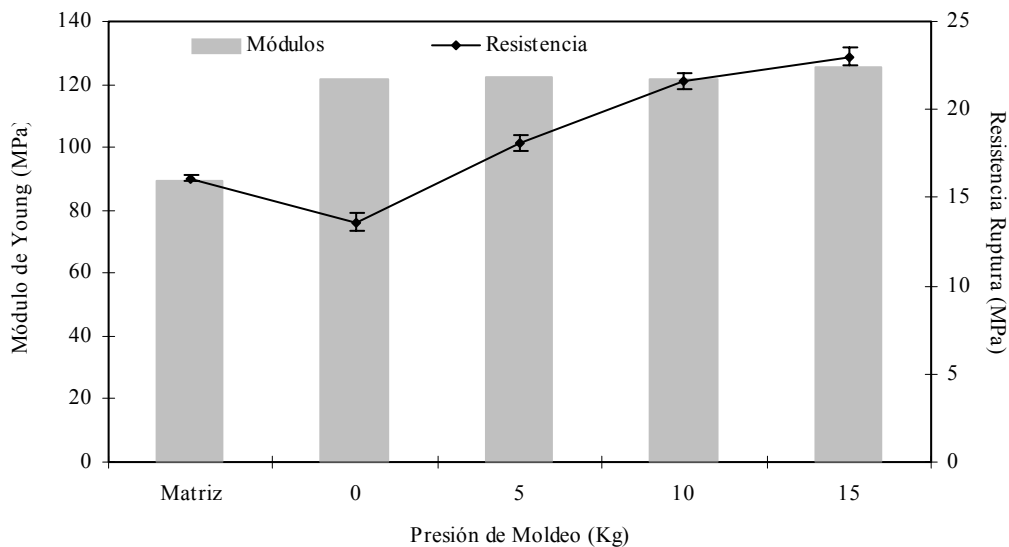


Figura 6. Relación de la resistencia a la ruptura y el módulo de tensión con la presión de moldeo para muestras con un contenido de 10% de fibra de 1 mm de longitud.

La aplicación de presión genera un incremento adicional de la resistencia a la ruptura, pero no así del módulo que tiende a mantenerse constante. Es decir, el material es más resistente conforme se incrementa la presión de moldeo, pero no varía la rigidez.

El módulo de un material compuesto depende de las propiedades de ambos componentes, fibra y matriz, así el módulo promedio del material compuesto (123 ± 11 MPa) es más alto que el de la matriz (89 ± 6 MPa). Lo anterior indica que la introducción de fibra en una matriz de resina poliéster genera que el material almacene mayor cantidad de energía para resistir ciertos esfuerzos con respecto a la matriz de resina sin fibra.

Por otra parte el incremento en la resistencia a la ruptura con el aumento de la presión de moldeo puede explicarse debido a la mejor humectabilidad de la fibra con la matriz debido a la presión, esto a la vez indica que el método de preparación del material es un factor que afecta las propiedades del producto final.

Evaluación de la adhesión fibra/ matriz por análisis de la superficie de fractura.

La técnica de microscopía electrónica es ampliamente utilizada en el estudio de los materiales reforzados con fibras dada su facilidad de manejo y a su gran utilidad en el estudio de morfologías, características interfaciales y mecanismos de rotura.

En este estudio fue observada la superficie de fractura de varias muestras en un microscopio electrónico de barrido para evaluar la adhesión fibra/matriz de los materiales compuestos obtenidos. En la Figura 7 se puede observar la morfología de la superficie de la fibra y la interfase fibra de piña/matriz de poliéster por microscopía electrónica de barrido (SEM) donde se observa que no existe una fuerte unión entre la fibra y la matriz ya que la mayor parte de la interfase presenta espacios donde la fibra está completamente separada de la matriz.

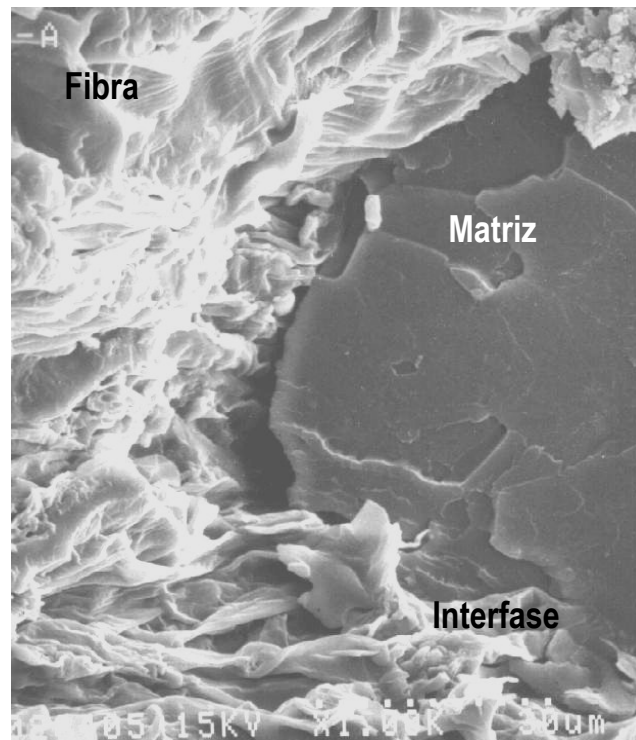


Figura 7. Micrografía SEM para la interfase fibra de piña/matriz de poliéster (SEM x 1.00 K).

La Figura 8 muestra las micrografías de la superficie de fractura de los materiales compuestos de rastrojo de piña con un 10% de fibra en masa fracturados al someterse a esfuerzos de tensión, donde (a) representa una muestra a la cual se le aplicó presión de moldeo. En esta se puede notar una menor cantidad de vacíos dejados por fibras no enlazadas con la matriz como sí ocurre en (b), que es la muestra a la que no se aplica presión de moldeo.

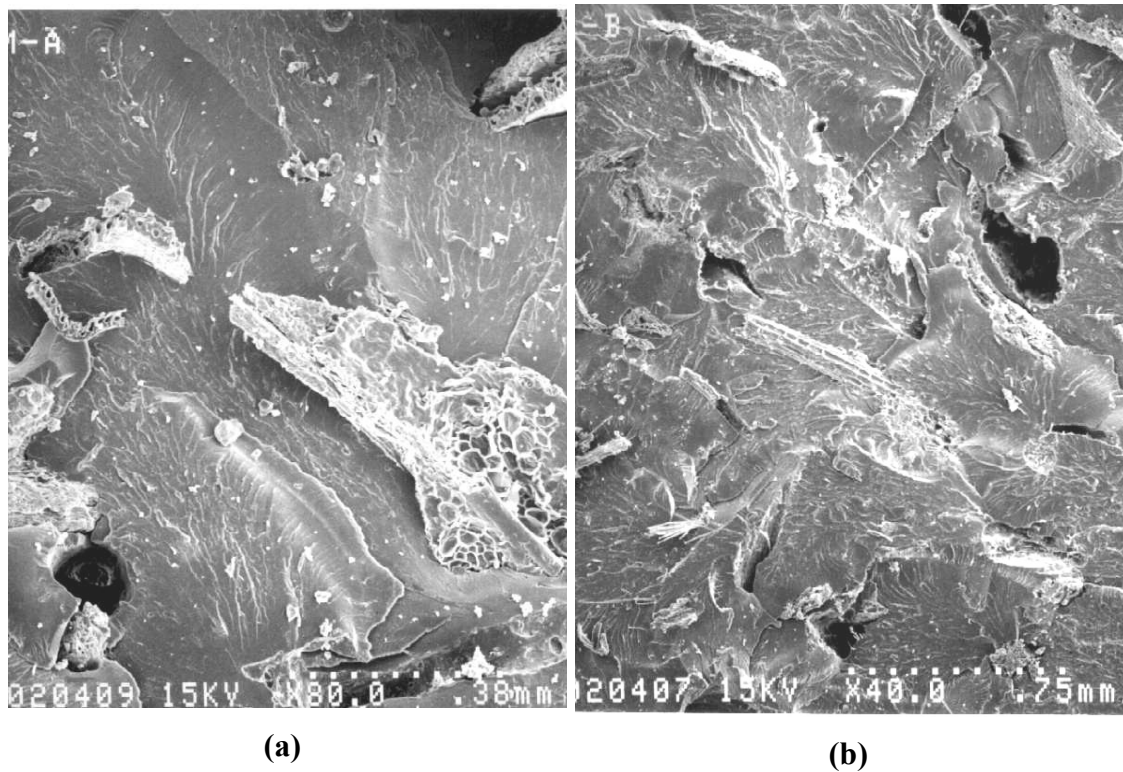


Figura 8. Superficie de fractura de materiales compuestos fracturados por tensión con 10% de contenido de fibra de 1 mm (SEM x 15K). a) con presión de moldeo, y b) sin presión de moldeo.

Los resultados obtenidos para la resistencia a la ruptura son confirmados por SEM que sugiere una mejor interacción entre la fibra y la matriz en el caso de los materiales en los que se aplica presión de moldeo. En la Figura 9 se presenta el corte superficial de las fibras inmersas en la matriz de poliéster.

Se puede observar que (a) presenta un corte más parejo donde hay pocos espacios vacíos dejados por fibras y no se visualizan extremos de fibra desenlazados visibles. Por el contrario, en (b) se puede observar el espacio dejado por una fibra que se desprendió por completo de la matriz, lo que indica una pobre unión con esta. Además en (b) se observa el extremo de una fibra cuyo corte no es efectivo como el que se muestra en (a) ya que parte de la fibra se desprendió del otro extremo del material al momento de la fractura.

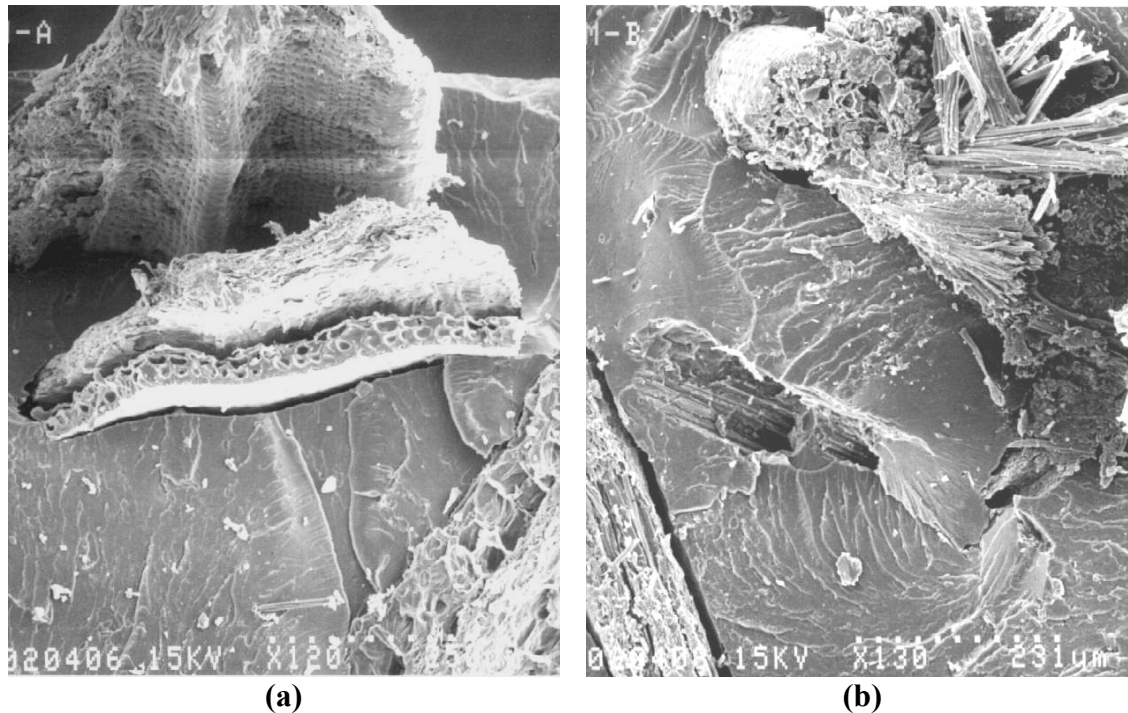


Figura 9. Corte superficial de las fibras inmersas en la matriz de poliéster (SEM x 15 K). a) con presión de moldeo, y b) sin presión de moldeo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En general, todas las propiedades mecánicas de la resina reforzada, excepto flexión, alcanzan valores similares o ligeramente superiores al presentado por la matriz sin que las propiedades mecánicas de la resina se vean afectadas desfavorablemente, lo que constituye por sí solo una ventaja ya que es posible introducir al menos un 10% y un 15% de una fibra a la que no se le está dando aprovechamiento.
- El contenido de fibra óptimo en resistencia a la ruptura por tensión es de un 10% y la longitud de fibra que proporciona mejor resistencia a la ruptura en los materiales obtenidos es de longitudes cercanas a 1 mm. Sin embargo, no se encontró una gran influencia del tamaño de fibra en las propiedades de tensión, lo que no justificaría la selección de un solo tamaño de fibra, desechando la posibilidad de utilizar los demás.
- Las propiedades de resistencia a flexión no mejoran con la introducción de fibras a la matriz, pero sí se obtiene un material capaz de deformarse más antes de romperse que la resina sin fibra.

- No se observó una influencia considerable del contenido de fibra sobre la densidad de los materiales a los porcentajes de fibra trabajados. La densidad de los materiales obtenidos tiende a mantenerse constante con la introducción de 5 a 15% de fibra. A contenidos mayores del 20% se observó una disminución del valor de la misma.
- Se obtuvieron mejoras en la adhesión fibra/ matriz al aumentar la presión de moldeo sobre el material que permitió lograr una mejor humectación de la fibra en la matriz, lo cual se confirmó a través de la evaluación de la resistencia a la ruptura y se verificó por microscopía electrónica de barrido.
- El módulo de Young es más alto en el material compuesto que en la matriz, pero permanece constante ante la introducción de fibra. La resistencia a la ruptura incrementa con el aumento de presión de moldeo del material.
- Se recomienda utilizar moldeo bajo presión controlada en estudios posteriores. Se requiere el diseño y elaboración de un molde con características mejoradas que el utilizado. Las mejoras en el moldeo de los materiales permitirán también aumentar la capacidad de la resina para contener mayor cantidad de fibra y mejorar la adherencia fibra/matriz. Es decir, la manera de procesar el material, afectará las propiedades finales del producto.
- Las fibras de rastrojo de piña sin tratamiento químico no han sido estudiadas antes como refuerzo de matrices poliméricas. Estas se extrajeron por técnicas mecánicas y han demostrado cierta potencialidad para ser utilizadas como refuerzo, a pesar de que no se obtuvieron propiedades sustancialmente mayores; constituye entonces una opción a considerar dentro de las clases de fibra existentes en nuestro país que podrían encontrar una aplicación en el área de los polímeros reforzados. Como tal, no hubo reforzamiento, sin embargo los resultados son válidos y establecen una base para futuros estudios de ese tipo en el país.
- Los resultados cuantitativos obtenidos en este estudio son aprovechables para posteriores diseños de materiales reforzados con fibras lignocelulósicas disponibles en nuestro país.

- Dada la resistencia a la tensión presentada por el material compuesto elaborado y su apariencia, podría ser utilizado en la elaboración de mesas o escritorios, en donde la resistencia para su desempeño no es tan elevada, mientras que el bajo peso y costo pueden ser una ventaja.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abhijit P. Deshpande, M. Bhaskar Rao y C. Lakshmana Rao “Extraction of Bamboo Fibers and their use as Reinforcement in Polymeric Composites. J. Appl. Polym. Sci., **76**, 83 (2000)
2. American National Standard Institute. (R 1974). “Standard Method of Test for Ash in Wood”. Designation D 1102-56. American National Standard 013.1-1960.
3. American National Standard Institute. (R 1974). “Standard Method of Test for Alpha-cellulose in Wood”. Designation D 1103-60. American National Standard 013.2-1960.
4. American National Standard Institute. (R 1974). “Standard Method of Test for Holocellulose in Wood”. Designation D 1104-56. American National Standard 013.3-1960.
5. American National Standard Institute. (R 1974). “Standard Method of Test for Lignin in Wood”. Designation D 1106-56. American National Standard 013.5-1960. 342, 343 p.
6. American National Standard Institute. (R 1974). “Standard Method of Test for Alcohol/benzene Solubility of Wood”. Designation D 1107-56. American National Standard 013.6-1960. 346, 345 p.
7. American National Standard Institute. (R 1974). “Standard Method of Test for Water Solubility of Wood”. Designation D 1105-56. American National Standard 013.9-1960. 349, 350 p.
8. R.Araya Sánchez, 1998. Utilización del rastrojo de piña (*Ananas comusus*) para la obtención de pulpa para la producción de papel. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2-6, 9-15, 27-29, 33 p.
9. J.M. Arribas, J.M. Navarro y C. Rial. “Compuestos de polipropileno reforzado con fibras vegetales. Una alternativa ecológica para la industria del automóvil”. Revista de Plásticos Modernos, **81**, 467 (2001)

10. M. Arroyo y L. Ibarra. 1995. Fibras orgánicas cortas como refuerzo de matrices poliméricas. *Revista de Plásticos Modernos*. 74: 226-232.
11. M. Barquero, 2004. Producción de la piña no se detiene. Periódico La Nación, sección de economía. pp 3.
12. M. Begemann, Fölster th. Goedel R., R. Kötte, M. Malfe, W. Michaeli, C. Netze, U. Rosenbaum, O. Specker, U. Ullmann, M. Weneger, F. Capella. 1989. Tecnología de los composites/plásticos reforzados. Anse Editorial, Barcelona, España, 67, 73, 74p.
13. Bjorksten Rsearch Laboratories Inc., Reinhold, New York, 1956. *Polyesters and their Applications*. pp. 1063.
14. A.K. Bledzki y J. Gassan. "Composites reinforced with cellulose based fibers". Elsevier Science Ltd., 1999.
15. CICY. Unidad de Materiales. Centro de Investigación Científica de Yucatán. http://www.cicy.mx/unidades/materiales/lineas/mat_esp.html. 8 de marzo del 2002.
16. E.P. Collar "Propiedades y Ensayo de los Materiales Plásticos", *Revista de Plásticos Modernos*, **475**, 32 (1996)
17. Cyted. "Caracterización morfológica, estructural y mecánica de materiales compuestos de matriz polimérica". 2001.
18. <http://www.redhucyt.oas.org/mercocyt/mercocyt/proyectosCB/pviii4.htm>. 15 noviembre de 2001.
19. L. Devi Uma, S.S. Bhagawan, Sabu Thomas "Mechanical Properties of Pineapple Lead Fiber-Reinforced Polyester Composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, **64**, 1739 (1997)
20. Enciclopedia de Tecnología Química.1998. Materiales compuestos, 860-864 p.
21. P. Frontini, L. Fasce, V. Pettarín y C. Bernal "Determinación de la tenacidad en impacto de polímeros a partir de la medición de la energía total de fractura", *Revista de Plásticos Modernos*, **80**, 180 (2000)
22. J.L. Gómez, C. Jarones y P. Gañan "Refuerzos naturales para materiales plásticos", *Revista de Plásticos Modernos*, **76**, 183 (1998)
23. INEC Instituto Nacional de Estadística y Censos. 2002. Boletín I Semestre: Estadísticas de Comercio Exterior. Vol. 1, Año 7. Costa Rica.
24. C.F. Jasso, H. Hernández, R. San-Juan D., J. González y E. Mendizábal. 2000. "Fibras celulósicas como agentes de refuerzo para resinas poliéster entrecruzadas con estireno o acrilato de butilo". CUCEI. <http://www.geocities.com/dkatime>. 06 de febrero del 2002.

25. G. Jayamol, S.S Bhagawan, Sabu Thomas “Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf fiber”, *J. Composite Sci. & Technology*, **58**, 1471 (1998)
26. J. Kuruvilla, T. Sabu, C. Pavitharan y M. Brahmakumar “Tensile Properties of Short Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composites”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **47**, 1731 (1993)
27. L. Leão, FX. Carvalho y E. Frollini (Editores) “Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and opportunities. Lignocellulosic Plastic Composites”. Editorial UNESP, San Pablo, Brasil, 1997, páginas 23-51.
28. Norma E. Marcovich, María M. Reboredo y M.I. Aranguren. “Mechanical Properties of Woodflour Unsaturated Polyester Composites”. *J. Appl. Polym. Sci.*, **70**, 2121 (1998)
29. C. Marieta y Mondra “Medida de la adhesión en interfases fibra/matriz de materiales compuestos”, *Revista de Plásticos Modernos*, **76**, 302 (1998)
30. Mohammad L. Hassam, Abd-Alla M., A. Nada “Utilization of Lignocellulosic Fibers in Molded Polyester Composites”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **87**, 653 (2003)
31. Moya. 2001. Producción y aprovechamiento de desechos agroindustriales en América Latina. Development of environmentally compatible polymers from biowaste, Heredia, Costa Rica, 76, 79, 82, 83 p.
32. D. Nabi y J.P. Jog “Natural Fiber Polymer Composites: A Review”, *Adv. Polym. Technology*, **18**, 351 (1999)
33. Jane L. O’Dell “Natural Fibers in Resin Transfer Molded Composites”. Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, 1997, páginas 280-285.
34. POLIUNA. 1995. Normas ASTM utilizadas para el análisis de materias plásticas. Laboratorio de Polímeros, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica 464 p.
35. POLIUNA 1999. Informe Final de proyecto: Fibras naturales como refuerzo de poliésteres comerciales. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. 256 p.
36. POLIUNA 2000. En Seminario Obtención de celulosa microcristalina y carboximetil celulosa de desechos agroindustriales. Heredia, Costa Rica.
37. PROCOMER 2002. Exportaciones de piña del año 2001. http://www.procomer.com/est/productos/index.cfm?quehacer=loadpage&page_4_8. 30 de abril del 2002.
38. L. Pothan, S. Thomas y N. Neelakantan. “Short Banana Fiber Reinforced Polyester Composites: mechanical, Failure and Aging Characteristics”. *J. Reinforced Plastics & Composites*, **16**, 756 (1997)

39. Aldo Ramírez “Propiedades morfológicas de fibras naturales para la fabricación de materiales de construcción”. Tecnología en Marcha, **12**, 127 (1996).
40. Rodríguez, Carlos. 2000. Estudios de Compatibilidad de Plásticos Reforzados con Fibras Lignocelulósicas. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Mecánica. 1-7 p.
41. Salom, C., R M. Masegosa y M G. Prolongo. “Fibras utilizadas en la fabricación de materiales compuestos avanzados”. Revista de Plásticos Modernos. 80: 534, 202 (2000).
42. M. Sibaja, P. Alvarado, R. Pereira y M. Moya. “Composites from banana tree rachis fibers. Recent Advances in Environmentally Compatible Polymers”. Woodhead Publishing. England, 2001, páginas 136-144.
43. J. Vega-Baudrit “Obtención de espumas rígidas de PU a partir de cáscara de piña”. Tesis de Licenciatura en Química. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 1994, página 16.
44. C. Zárate, M.I. Aranguren y M.M Reborado. “Resol-Vegetable Composites”, J. Appl. Polym. Sci., **77**, 1832 (2000)
45. W H.Zhu y B.C. Tobías “Banana fiber strands reinforced polyester composites”, J. Materials Science Letters, **14**, 508 (1995)