

## **VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE FIBRAS VEGETALES COMO REFUERZO DE PLÁSTICOS INDUSTRIALES**

Amigó, V.<sup>1\*</sup>, Salvador, M.D.<sup>1</sup>, Sahuquillo, O.<sup>1</sup>, Llorens, R.<sup>2</sup>, Martí, F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, España

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico del Plástico - AIMPLAS, Valencia, España

### **Resumen**

La producción de fibras vegetales produce gran cantidad de residuos que, además de provocar problemas medioambientales en origen, no son aprovechados por lo que las zonas productoras pierden gran cantidad de sus recursos económicos. Además, el aprovechamiento de estas fibras en la industria textil, cordelera o de empaques, genera otros residuos que pueden ser aprovechados como elementos de refuerzo en polímeros termoplásticos, mejorando con ello las propiedades mecánicas del compuesto y recuperando las pérdidas ocasionadas por el reciclado mecánico de los plásticos. En la actualidad, la mayor parte de residuos de las industrias textil y agrícola se desechan y por tanto, la utilización de estos residuos como refuerzo en matrices poliméricas incrementa el valor del plástico reciclado y contribuye a reducir la cantidad de residuos vegetales mejorando la competitividad del sector textil y agroindustrial.

El objetivo de este trabajo es el estudio de varias fibras de origen vegetal (algodón reciclado, lino, cáñamo, kenaf, sisal y fique) que serán utilizadas como material de refuerzo en polietileno de alta densidad reciclado. Se han realizado análisis termogravimétricos de las fibras para comprobar su estabilidad térmica, así como su resistencia mecánica mediante microensayos de tracción y, finalmente, su caracterización morfológica mediante técnicas de microscopía.

*Palabras clave: Fibras vegetales, sisal, algodón, TGA, polietileno*

### **1. Introducción**

En la industria de la construcción ha empezado a utilizarse materiales compuestos de harina de madera con Polipropileno (PP), Polietileno (PE) o Cloruro de polivinilo (PVC) y resinas termoestables. Estos compuestos, conocidos como Wood-Plastic Composites (WPC), han experimentado en Estados Unidos importantes avances, tanto en sus propiedades y procesado como en aceptación por el consumidor [1, 2]. Los compuestos reforzados con fibras, presentan excelentes propiedades mecánicas, comparables a los WPC, e incluso superiores, para contenidos en fibras netamente inferiores [3-6]. Sin embargo, cuando se trata de residuos fibrados, estas resistencias disminuyen considerablemente.

Por otra parte, las poliolefinas como el polipropileno (PP) y polietileno de baja densidad (LDPE), son los materiales poliméricos de mayor consumo debido a sus interesantes propiedades y bajo costo. Además poseen la ventaja de un fácil y económico procesado y posibilidad de reciclado y la incorporación de fibras cortas de refuerzo permite aumentar la rigidez y resistencia de estos materiales manteniendo la posibilidad de su transformación mediante las técnicas convencionales empleadas para procesar termoplásticos [5-8]. Los factores básicos en el refuerzo son la resistencia, la dureza y la relación forma de la fibra [5, 6,

---

\* Correspondencia: [vamigo@mcm.upv.es](mailto:vamigo@mcm.upv.es)

9, 10], la compatibilidad con la matriz (que confiere una buena adhesión en la interfase fibra/matriz) y la concentración de la fibra en el compuesto final [6, 10].

En general a grandes deformaciones y cuando no existe una buena adhesión en la interfase, la incorporación de fibras cortas a un polímero produce la aparición de defectos en la interfase. Estos se ponen de manifiesto en una disminución de la resistencia debido a la concentración de tensiones creadas por solapamiento de fibras y los extremos de las mismas. Si la adhesión es buena, aumenta la resistencia y la unión fibra-polímero dificulta la formación de huecos y por lo tanto su deformación. En todo caso, la deformación del material a rotura será controlada por la resistencia del propio material y por la adhesión fibra-matriz [11], sirviendo la regla de las mezclas como guía para conocer el efecto de las fibras en las propiedades finales [6, 10-12]. Así, estructuras fuertemente compactadas, es decir, con huecos interfaciales mínimos darán lugar a estructuras de alta resistencia [6, 12]. La fracción de empaquetamiento óptima se produce cuando la conjunción entre dimensiones de la fibra (relación de forma longitud/diámetro) y las características de la matriz polimérica son las adecuadas, pudiéndose calcular la eficacia de la fibra con los trabajos de Pan [13].

De aquí la necesidad de conocer las propiedades de las fibras cuando se trata de reciclar residuos fibrosos agro-industriales pues las propiedades físicas y de forma pueden verse ampliamente modificadas, lo que representará el objetivo principal del presente trabajo y nos permitirá entender las variaciones en las propiedades finales del compuesto PE/fibras.

## 2. Proceso experimental

En el presente trabajo se analizan, principalmente, fibras procedentes de residuos textiles de algodón y lino, y fabricación de cuerdas como sisal, cáñamo, fique y kenaf.

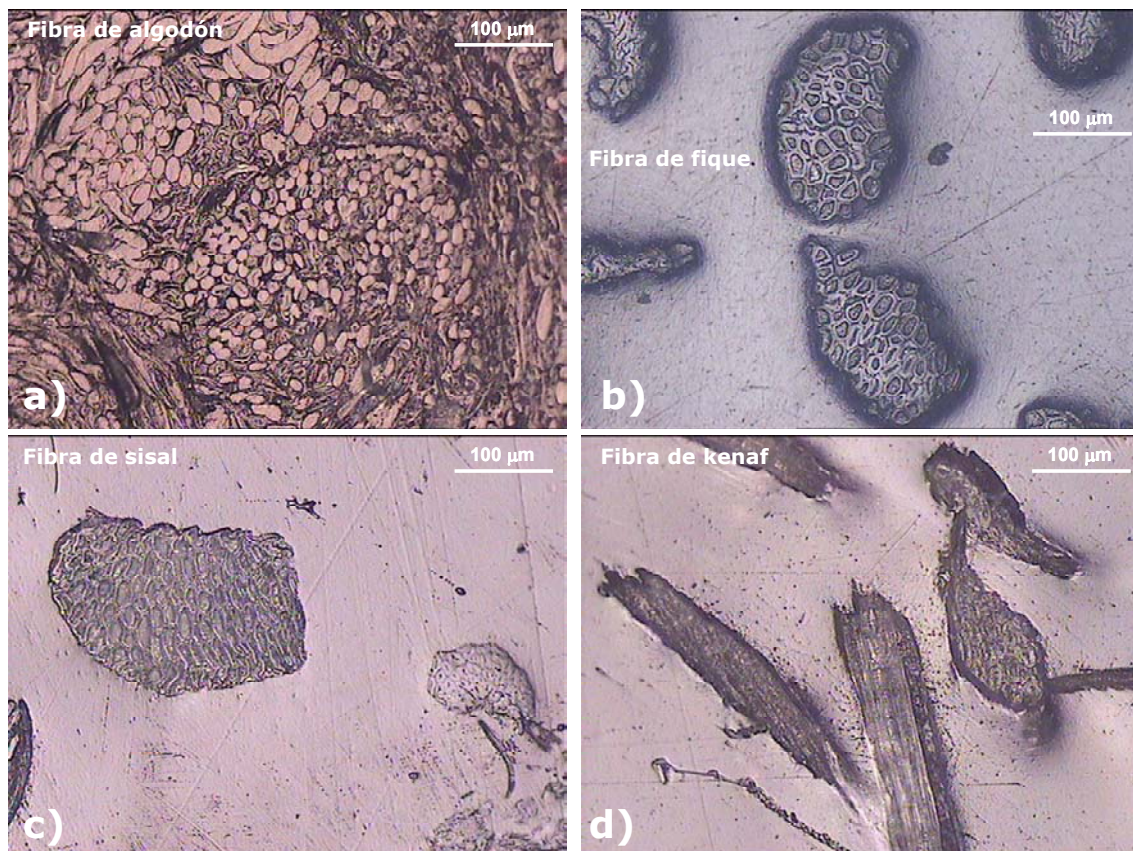


Figura 1. Imágenes de microscopía óptica de los cortes transversales de diferentes fibras: a) Algodón, b) fique, c) sisal y d) kenaf.

De cada una de ellas se ha analizado su morfología por microscopía óptica, MO, figura 1, mediante un microscopio Microphot FX de Nikon Inc., y electrónica de barrido, MEB, con un equipo JSM 6300 de JEOL Ltd. equipado con un sistema de microanálisis INCA de Oxford Instruments. En la figura 2 se recoge las imágenes de electrones secundarios obtenidas a diferentes aumentos para las distintas fibras analizadas.

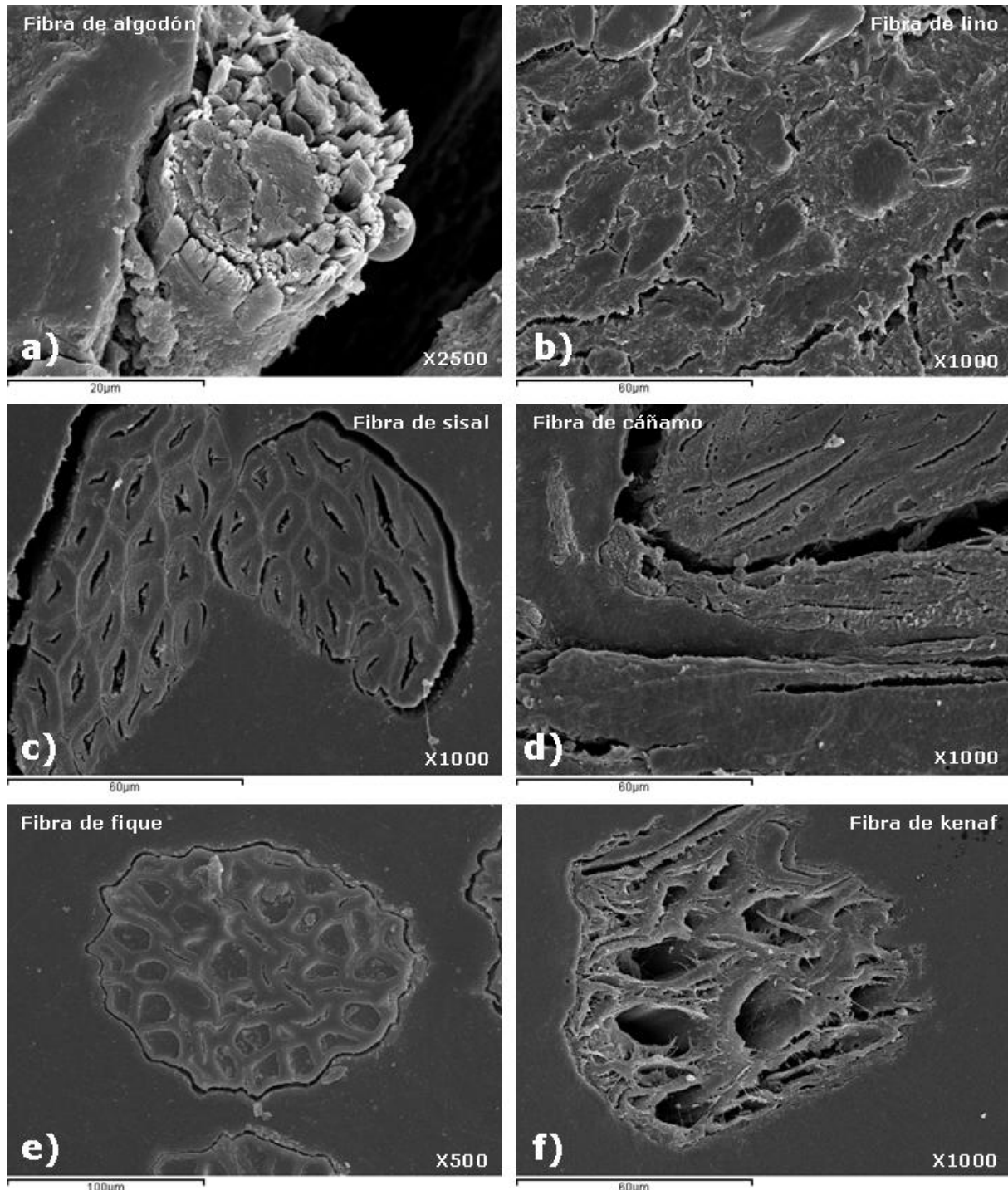


Figura 2. Imágenes de electrones secundarios de los cortes transversales de las diferentes fibras estudiadas: a) Algodón, b) lino, c) sisal, d) cáñamo, e) fique y f) kenaf.

El análisis superficial mediante microscopía de fuerza atómica, AFM, se realiza con un Nanoscope v5.30r2 de Veeco Instruments, obteniendo imágenes tridimensionales

semejantes a las obtenidas por MEB, tal como se aprecia en la figura 3 para algunas de las fibras analizadas.

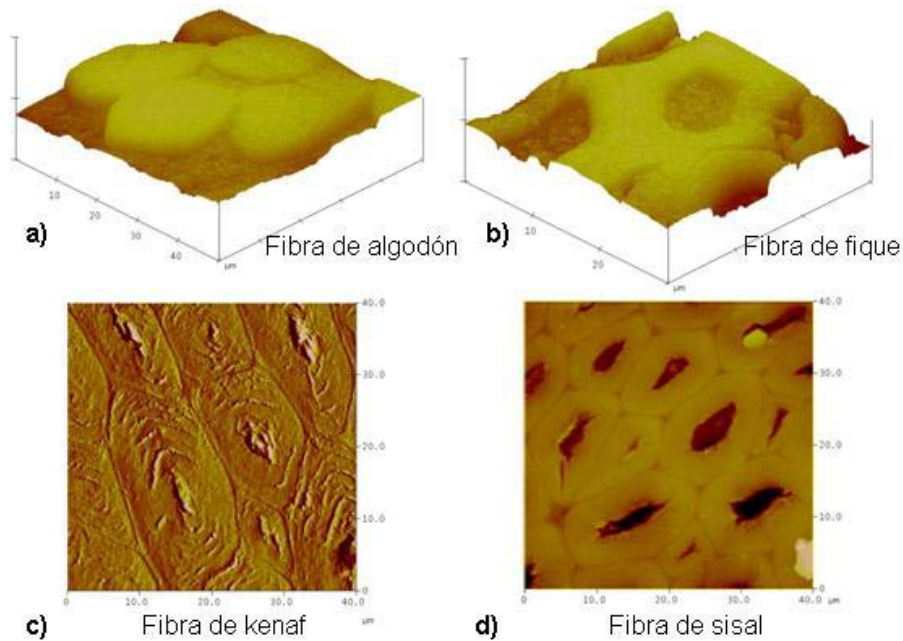


Figura 3. Imágenes de microscopía de fuerza atómica de diferentes fibras estudiadas: a) Algodón, b) fique, c) kenaf y d) sisal.

La resistencia a tracción de las fibras se ha obtenido mediante un módulo de tracción y compresión MTEST2000 de Gatan Inc, determinando tanto la resistencia máxima como el módulo de elasticidad.

La degradación de las fibras se ha estudiado mediante un equipo de termogravimetría TGA Q50 de TA Instruments, utilizando  $N_2$  como gas de purga.

La obtención de los compounds se ha realizado mediante una extrusora planetaria Entex montando seis husillos tipo transporte en la primera zona y otros seis en la segunda, figura 4b, una vez peletizadas las fibras en una prensa de matriz plana Amandus KAHL. Finalmente, el compound se ha inyectado en una Inyectora ARBURG 420C, modelo ALLROUNDER 1000/350 para obtener las diferentes probetas normalizadas para su ensayo.



Figura 4. a) Aspecto de la fibra de sisal antes de la peletización. b) Aspecto general de los compounds obtenidos con fibras de algodón y sisal al 30%.

### 3. Resultados y discusión

Las fibras presentan diferentes composiciones y propiedades físicas que presentan una elevada influencia en la compatibilidad con las matrices poliméricas y por tanto en las propiedades finales del compuesto. La tabla 1 recoge algunos de los parámetros físicos más importantes de algunas de las fibras investigadas junto a la de otras fibras que se han obtenido de distintas referencias.

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Humedad (%)
Cáñamo <sup>a</sup>	1,48	88-90	7-10	1,5-2,0	3,5-8,0
Sisal	1,45	65	12	9,9	10
Plátano <sup>b</sup>	1,35	63-64	19	5	10-11
Piña <sup>b</sup>	1,53	81	-	12,7	13,5

<sup>a</sup> de referencia [14], <sup>b</sup> de referencia [5]

Tabla 1. Propiedades físicas de distintas fibras naturales.

Las propiedades mecánicas de las fibras resultan bastante diversas y dependen mucho de las condiciones en las que se encuentra la fibra, principalmente en cuanto a su grado de humedad. En la tabla 2 se recogen algunos parámetros mecánicos obtenidos en las diferentes fibras comparándolos con las fibras de vidrio más comúnmente utilizadas así como algunos datos obtenidos de las referencias bibliográficas.

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elasticidad (GPa)	Resistencia tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (%)
Algodón <sup>a</sup>		4,98-10,92	264-654	3,0-7,0
Lino		24,00	300-900	2,7-3,2
Cáñamo	1,48		285	1,3
Sisal	1,45	10,40 <sup>c</sup>	444-552	2,0-2,5
Platano <sup>b,c</sup>	1,35	20,00	550	5,0-6,0
Piña <sup>b</sup>	1,53	4,20	413	3,0-4,0
Yute <sup>a</sup>		43,80	342-672	1,7-1,8
Vidrio <sup>a</sup>	2,54	56-72	2500	3,0

<sup>a</sup> referencia [10], <sup>b</sup> referencia [5], <sup>c</sup> referencia [15]

Tabla 2. Características de diferentes fibras empleadas en la modificación de termoplásticos.

Para realizar las mezclas con las fibras naturales ha sido necesario una dosificación correcta de las fibras, debido a su baja densidad, cuyo resultado ha sido la obtención de pelets consistentes, mediante la adición del 15% de una solución al 0,25% de sal carboximetilcelulosa sódica, como los observados en la figura 4b, para el sisal, que permitan una buena alimentación con los dosificadores gravimétricos y al mismo tiempo que puedan romperse en el interior de la extrusora para su correcta mezcla y distribución en el material termoplástico.

Para los compuestos se ha utilizado un PE reciclado con un índice de fluidez de 26,44 g/min y se ha aplicado como compatibilizantes el Integrate NP594-008 y el Bondyram 5001 al 5% realizando pruebas sin lubricante, o con él para lo que se añade un 6% de Struktol TPW 113 y un 0,5% de antioxidante Irganox B225. Las pruebas sin lubricante, producen materiales poco homogéneos y para contenidos en fibra superiores al 45% de sisal, las fibras no se

incorporan correctamente, figura 5a. Con lubricación se obtiene una gran mejora en el aspecto del hilo, aunque debe incorporarse el mínimo lubricante necesario para evitar deslizamientos del material que provoquen una falta de uniformidad en el extruido, figura 5b.

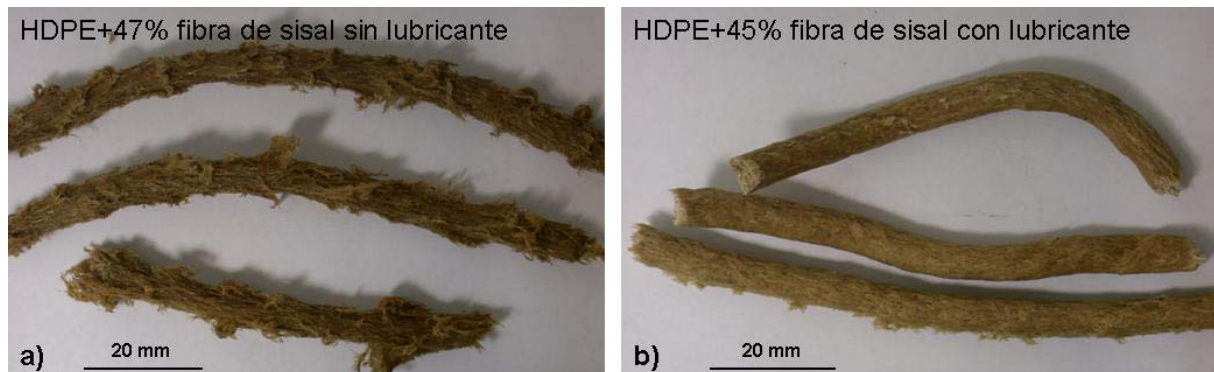


Figura 5. Diferencia en el aspecto de los compounds PE con 45% de fibras de sisal.  
a) Sin lubricación, y b) con lubricación.

En la mayoría de fibras, incluida el sisal, no aparecen problemas importantes en la obtención de compuestos termoplásticos [9-11, 14, 15] cuando el contenido en fibras se mantiene alrededor del 30%, y cuyas propiedades dependen principalmente de la longitud de las fibras, así como de su diámetro. Tal como se ha indicado anteriormente, las propiedades de las fibras resultan bastante dispares, tabla 2, con módulos de elasticidad bastante bajos en el caso del algodón, piña o sisal, hasta valores bastante elevados, como el lino, plátano o yute, en cuyo caso alcanza valores semejantes a la fibra de vidrio. Los valores de resistencia máxima presentan variaciones importantes incluso para las mismas fibras por la constitución y morfología de los residuos industriales a utilizar. Esto hace que se tengan resistencias máximas entre 26,6 y 30 MPa, en el caso de PP reforzado con un 30% de sisal o cáñamo, muy semejantes a los del PP [3].

En pruebas de impacto realizadas con PE/30% algodón, su resistencia a temperatura ambiente y a  $-5^{\circ}\text{C}$  ha resultado de 22 y 21  $\text{kJ/m}^2$ , mientras que para el polietileno no se ha presentado rotura de las probetas en estas mismas condiciones.

Uno de los posibles factores de mayor influencia en estas propiedades finales del compuesto es la propia degradación térmica de las fibras durante las operaciones de obtención de los compuestos que implican la obtención de los compounds y la extrusión o inyección final para obtener las piezas, tal como muestra la figura 6.

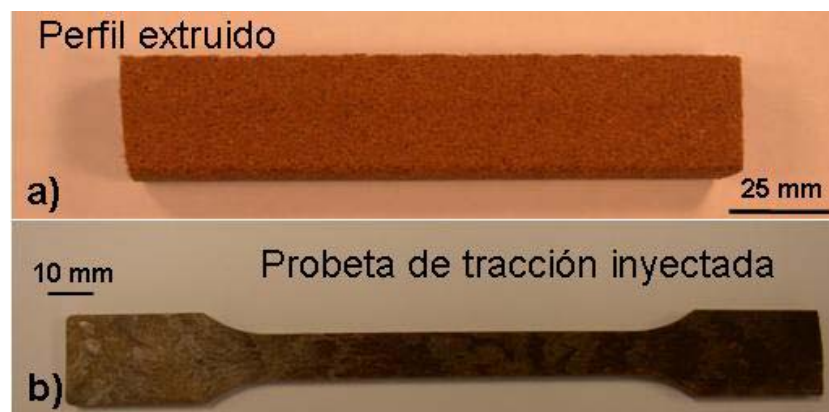


Figura 6. Ejemplos de muestras obtenidas en procesos de: a) extrusión y b) inyección.

Esta degradación, obtenida mediante análisis de TGA, presenta una temperaturas críticas de 320-350°C en prácticamente todas las fibras, figura 7, con temperaturas mínimas de 275°C para las fibras de hojas como el propio sisal, figura 8a, mientras el algodón comienza su degradación a las temperaturas más elevadas de todas las fibras analizadas, 343°C, figura 8b. Esto puede ser una de las causas que diferencian el comportamiento mecánico de los compuestos obtenidos con el polietileno reforzado con un 30% de fibras de sisal o algodón y que presentan tensiones máximas de 39,9 y 36,7 MPa respectivamente, frente a los 26,0 MPa del HDPE reciclado que sirve de matriz, pero con alargamientos mucho más bajos, de 4,6% y 5,2% respectivamente frente al 192,1% del HDPE que actúa como matriz.

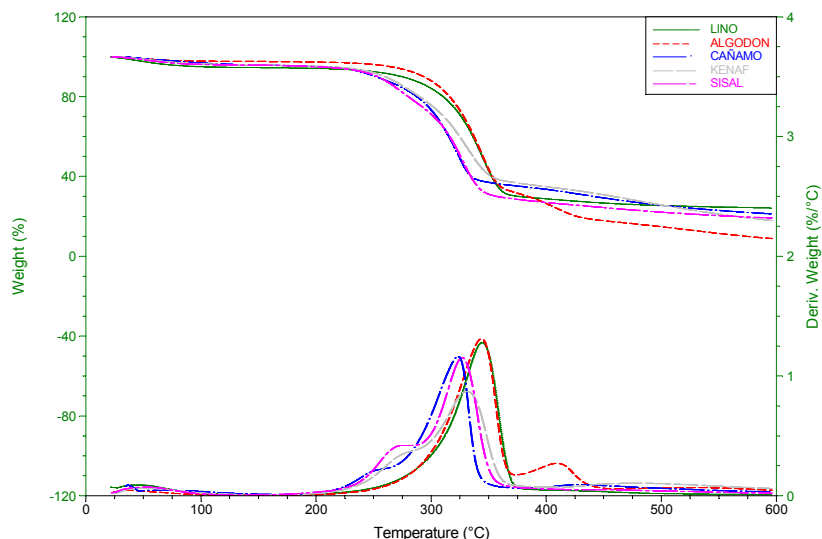


Figura 7. Curvas TGA en diferentes fibras analizadas.

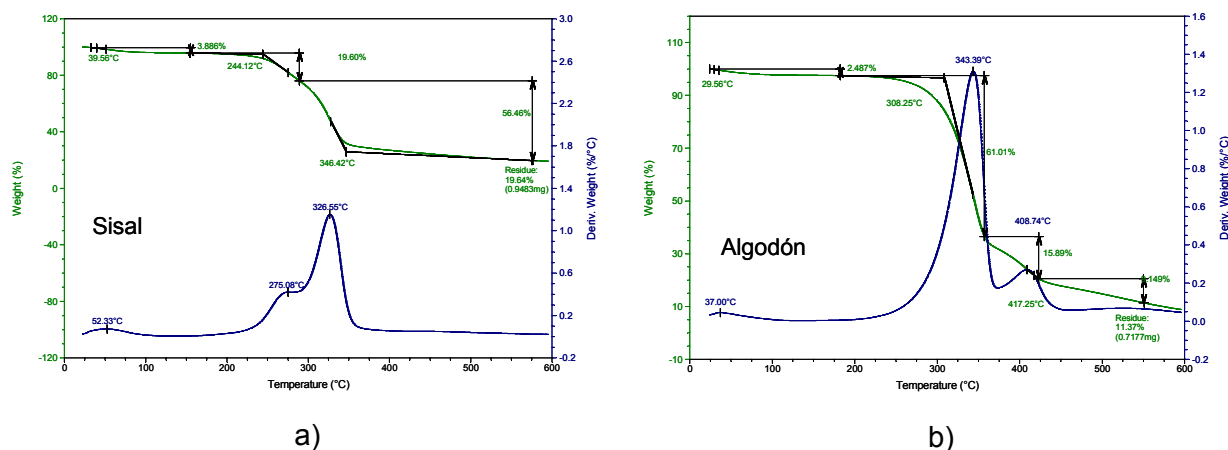


Figura 8. Curvas termogravimétricas de: a) fibra de sisal, b) fibra de algodón.

#### 4. Conclusiones

El aprovechamiento de fibras vegetales de desecho es perfectamente viable con la peculiaridad de su disparidad en forma y tamaño obligando a la peletización previa y a la utilización de compatibilizantes para obtener el producto final.

La adición de lubricación en los procesos de extrusión e inyección facilita, por una parte, su procesado y mejora tanto el aspecto como las propiedades finales del producto obtenido.

La incorporación de fibras aumenta ligeramente las propiedades resistentes del polímero base, en nuestro caso HDPE reciclado, pero a cambio disminuyen sus propiedades plásticas y la tenacidad, aunque todavía mantienen unas resistencias a impacto superiores a los 20 kJ/m<sup>2</sup> sobre todo en los materiales reforzados con fibras de algodón.

Todas las fibras presentan degradaciones semejantes con la temperatura por lo que su procesabilidad en los procesos de extrusión e inyección es posible, tal como se demuestra en el presente trabajo.

## 5. Referencias

- [1] Principia Partners. Natural & Wood Fiber Composites: the Principia Newsletter, 1 (2002).
- [2] Power, M. The plastic revolution. *Builder*. (2004) 356-364.
- [3] Bourmaud, A., Baley, C. *Polymer Degradation and Stability* 92 (2007) 1034-1045.
- [4] Zampaloni, M., Pourboghrat, F., Yankovich, S.A., Rodgers, B.N., Moore, J., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., Misra, M. *Composites: Part A* 38 (2007) 1569–1580.
- [5] Idicula, M., Boudenne, A., Umadevi, L., Ibos, L., Candau, Y., Thomas, S. *Composites Science and Technology* 66 (2006) 2719–2725.
- [6] Herrera-Franco, P. J., Valadez-González, A. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35 (3) (2004) 339-345.
- [7] Arroyo, M., Sánchez Berna, M., Vigo, J. P., *Polym. Eng. Sci.* 31 (1991) 245.
- [8] Avalos, F., Arroyo, M., Vigo, J. P., *J. polym. Eng.* 9 (1990) 157.
- [9] Sreekumar, P.A., Joseph, K., Unnikrishnan, G., Thomas, S., *Composites Science and Technology* 67 (2007) 453–461.
- [10] Joseph, P.V., Joseph, K., Thomas, S., *Composites Science and Technology* 59 (1999) 1625-1640.
- [11] Martínez, L.M., López Manchado, M., Vázquez, A., Arroyo, M., “Efecto de distintos tipos de fibra corta en las propiedades mecánicas de las mezclas de polipropileno/polietileno”. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, (2000) 1017-1024.
- [12] Beldzki, A.K., Gassan, J., *Prog, Polymer Science* 24 (1999) 221-274.
- [13] Pan, N., *Polymer Composites*, (1993).
- [14] Madsen, B., Hoffmeyer, P., Thomsen, A.B., Lilholt, H., *Composites: Part A* 38 (2007) 2194–2203.
- [15] Murali Mohan Rao, K., Mohana Rao, K., *Composite Structures* 77 (2007) 288–295.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Medio Ambiente por su soporte a través del proyecto A581/2007/2-02.2 enmarcado en el Programa Nacional de Ciencias y Tecnologías Medioambientales del Plan Nacional de I+D+i, así como al Programa CYTED por su apoyo en movilidad a través de la Acción de Coordinación de Proyectos de Investigación 307AC0307.