

PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS TERMOPLÁSTICOS UNIDIRECCIONALES REFORZADOS CON FIBRAS DE INGENIERÍA

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH ENGINEERING FIBERS

P.I. González-Chi* y W. Ramos-Torres

Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Unidad de Materiales. Calle 43, No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200. Mérida, Yucatán, México.

Recibido 20 de Julio 2006; Aceptado 15 de Marzo 2007

Resumen

El presente trabajo consistió en la preparación y caracterización mecánica de materiales compuestos a base de una matriz termoplástica de polipropileno reforzada unidireccionalmente con fibras de ingeniería (Twaron, Kevlar y Carbón). Las fibras fueron impregnadas con el método de polvos en el que los parámetros como altura de impregnación, tamaño de partícula y tiempos de impregnación fueron controlados para determinar los correspondientes perfiles de impregnación y, con base en estos, se establecieron las condiciones necesarias para preparar materiales compuestos con un contenido de fibra específico. Las fibras impregnadas fueron laminadas por compresión y los materiales caracterizados mecánicamente a tensión. Los resultados demuestran que el método de impregnación por polvos es una alternativa viable para obtener materiales compuestos termoplásticos con diversos contenidos de fibra en forma reproducible y confiable.

Palabras clave: materiales compuestos termoplásticos, método de polvos, polipropileno, fibras de aramida.

Abstract

Thermoplastic composites based on a polypropylene matrix were prepared and mechanically characterized; these composites were unidirectionally reinforced with engineering fibers (Twaron, Kevlar and Carbon). The powder method was used to impregnate the fibers; the impregnation parameters like impregnation height, particle size and impregnation time, were controlled to create the impregnation profiles from where the impregnation conditions for the composite prepared were established. The impregnated fibers were compression molded and tested at tension. The results show that the powder method is a useful alternative to efficiently prepare thermoplastic composites with different fiber contents.

Keywords: thermoplastic composites, powder method, polypropylene, aramid fibers.

1. Introducción

El desarrollo tecnológico, la demanda de nuevos productos y la necesidad de materiales que puedan ser reciclados, han influenciado directamente el estudio y desarrollo de materiales a base de matrices termoplásticas reforzadas con fibras sintéticas o naturales. De esta manera han surgido materiales con atractivas propiedades mecánicas que compiten con el acero y otros metales; las matrices termofijas han sido las más utilizadas, debido a su fácil procesamiento, su buena adherencia a las fibras y a su excelente resistencia a los químicos. Sin embargo, una de sus desventajas respecto a las matrices termoplásticas es que, una vez curadas, son prácticamente infusibles e insolubles, por lo que presentan problemas de reciclado.

La manufactura de materiales compuestos fibro-reforzados para aplicaciones estructurales, a base de matrices termoplásticas, tiene una renovada demanda. Sin embargo, una de sus limitantes es la carencia de buenas técnicas de procesamiento. Diferentes métodos han sido empleados para preparar cintas termoplásticas pre-impregnadas; cada uno de ellos con sus complicaciones específicas, no obstante, en todos se busca un objetivo común: obtener un buen producto a un bajo costo, usando un método barato y rápido de producción.

Tradicionalmente, los métodos de impregnación por fusión, solución y suspensión han sido utilizados para la preparación de materiales compuestos termoplásticos, pero estos métodos presentan complicados ciclos de procesamiento. Por otra parte, las tecnologías actuales y los

* Autor para la correspondencia: E-mail: ivan@cicy.mx
Fax: +52 (999) 981 3900

requerimientos ambientales hacen que los métodos de impregnación por solución y suspensión sean cada vez menos usados, ya que requieren del manejo de disolventes. La impregnación por solución consiste en remojar las fibras en una disolución de la resina y luego el solvente es evaporado, quedando la matriz depositada en la superficie de la fibra (Cowie, 1991; Bourban y col., 1998). El método por suspensión consiste en sumergir las fibras en una mezcla de dos sustancias no miscibles, donde una es un líquido volátil y la otra un polímero en polvo; las fibras son entonces secadas, quedando las partículas de la matriz impregnadas a la superficie de las fibras (Cowie, 1991; Cogswell, 1991).

La impregnación por fusión consiste en embeber las fibras de refuerzo en una matriz polimérica fundida. Sin embargo, este líquido polimérico fundido tiene una alta viscosidad que se traduce en una alta tensión superficial, lo que limita la penetración de la matriz entre las fibras (Cowie, 1991).

El método de impregnación por polvos es investigado ya que provee de alternativas viables para la manufactura de materiales compuestos termoplásticos (Drzal y col., 1990; Olson, 1990) y posee numerosas ventajas respecto a las otras técnicas mencionadas:

- No requiere de la eliminación de solventes residuales.
- Los objetos moldeados no poseen remanentes de disolvente.
- Es un proceso flexible, continuo de bajo costo de inversión y operación.
- Conduce a un producto final flexible.
- Puede ser aplicado a un amplio rango de polímeros termoplásticos (incluso aquellos que fundidos, poseen una alta viscosidad).
- Genera una baja contaminación de aire.
- Permite una óptima recuperación de material.

El método consiste en introducir el polvo termoplástico seco dentro de una mecha de fibras, entonces, las partículas son adheridas y fundidas a la superficie de las fibras, lo que genera una preforma que es introducida en un molde para convertirla en una lámina.

Un polímero en polvo ideal para el método de polvos debe tener las siguientes características para considerarlo como útil para el procesamiento de materiales compuestos (Drzal y col., 1990; Olson, 1990):

- El tamaño de partícula promedio del material usado debe ser aproximadamente igual o menor al diámetro de la fibra, para así lograr una impregnación óptima.
- La concentración de polvo en la cámara de impregnación, en donde las partículas están en contacto con la fibra, debe ser constante y controlable a todo tiempo.

- La fibra pre-impregnada resultante debe ser flexible de tal forma que su manipulación facilite los siguientes pasos de moldeo.

La fluidización de partículas sólidas se logra al hacer pasar una corriente de un fluido a través de un lecho granular. Esta operación posee características intermedias entre el desplazamiento de sólidos en el seno de un fluido y el flujo de fluidos entre partículas de sólidos (Baucom y col., 1990; Brown, 1965). Cuando un fluido atraviesa de abajo hacia arriba un lecho de partículas cuyos tamaños son relativamente pequeños, se establece una pérdida de presión necesaria para desplazar las partículas. Cuando la pérdida de presión se acerca al peso del lecho por unidad de superficie de la sección transversal al fluido, las partículas sólidas comienzan a moverse. Para que estas partículas puedan moverse a través del fluido se deben vencer tres fuerzas (Brown, 1965; Rath y col., 1998):

- Fuerza externa, de gravedad o centrífuga.
- Fuerza de flotación, que actúa paralela a la fuerza externa pero en dirección opuesta.
- Fuerza de frotamiento, que aparece siempre que existe un movimiento relativo entre una partícula y el fluido.

El presente trabajo consistió en estudiar el método de impregnación por polvos, para preparar materiales compuestos con una matriz termoplástica de polipropileno reforzada con fibras de ingeniería: Kevlar, Twaron y Carbón. Las fibras de ingeniería proveen al material de una gran resistencia a la tensión, lo que posibilita su utilización en partes estructurales y elementos mecánicos. El estudio de las propiedades mecánicas de estos materiales es la base para el diseño de laminados que puedan ser utilizados en aplicaciones tales como piezas automotrices a gran escala, artículos para vivienda, piezas para robots y materiales que pueden soportar fuertes cargas dinámicas.

2. Materiales

La matriz usada fue polipropileno (PP) en polvo de PEMEX PP30. Tres diferentes tipos de polvos fueron utilizados, cada uno con un tamaño promedio de partícula característico (Tabla 1); se sabe de trabajos previos que la distribución de los tamaños de partícula de cada uno de estos polvos es bastante amplia, al grado de sobreponerse entre ellas (González y col., 2004).

La Tabla 2 presenta las propiedades mecánicas a tensión del PP (May, 2002), así como las propiedades mecánicas de las fibras de ingeniería usadas como refuerzo (Ramos, 2004):

- Twaron 2200 de Akzo Nobel con "sizing" (densidad lineal: 1.69 mg/cm, diámetro: 12 μ m).

- Twaron 2200 de Akzo Nobel sin “sizing” (densidad lineal: 1.69 mg/cm, diámetro: 12 µm).
- Kevlar 49 de DUPONT (densidad lineal: 1.72 mg/cm, diámetro: 12 µm).
- Carbón de HEXCEL (densidad lineal: 8.2 mg/cm, diámetro: 7 µm).

Tabla 1. Tamaños promedio de partícula para el PP

	Polvo A	Polvo B	Polvo C
Media (µm)	406.70	300.80	88.40
D. Estándar	193.86	167.90	110.07

(González y col., 2004).

3. Métodos

3.1. Preparación de marcos para la impregnación.

Las mechas de cada fibra (Kevlar, Twaron y Carbón) fueron cortadas a una longitud aproximada de 20 cm. Los filamentos de cada mecha fueron separados manualmente y extendidos axialmente en marcos de aluminio (Fig. 1). La zona de impregnación es el área comprendida entre las barras de aluminio laterales.

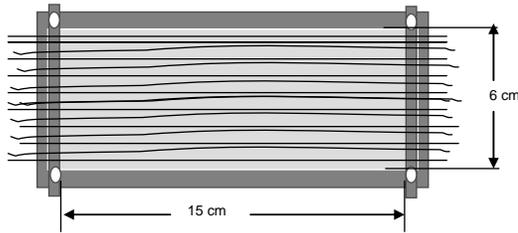


Fig. 1. Marco de aluminio utilizado para la impregnación de las fibras.

3.2. Condiciones de impregnación

Los polvos A y B fueron utilizados para las fibras de Twaron y Kevlar; el polvo C, para las fibras de Carbón. Las tres fibras fueron impregnadas a diferentes tiempos, variando la altura de impregnación (AI - altura de las fibras sobre la superficie del polvo en la cámara de impregnación) pero manteniendo constante la presión de aire. Las AI probadas para Twaron y Kevlar fueron 5 y 7 cm con el polvo B y 3 cm con el polvo A. Los tiempos de residencia de 80, 40, 13 y 10 s, generaron para el

Twaron impregnaciones con un contenido de fibra de 11, 21.7, 28.6 y 38 %; para Kevlar se usaron tiempos de residencia de 80, 50, 15 y 10 s, que corresponden a 11.2, 17.6, 31.8 y 42.8 % de fibra. En el caso de la fibra de Carbón, las AI usadas fueron de 3, 5 y 6 cm con el polvo C y 3 cm con el polvo B, los tiempos de impregnación fueron 30, 20, 15 y 10 s, logrando contenidos de fibra de 12.3, 16.9, 32.2 y 39.7 %. Las fracciones en peso de fibra fueron determinadas de muestras seleccionadas, usando 12 h de extracción soxhlet en xileno a 200 °C.

3.3. Impregnación de fibras sin “sizing”

El recubrimiento comercial protector (“sizing”) de la fibra de Twaron fue extraído vía soxhlet en un estudio anterior, de donde se determinó que contiene 0.68 % de “sizing” respecto al peso de la fibra (Mena, 2001). Esta fibra fue usada para preparar materiales compuestos con 10 % de fibra (polvo A, tiempo de residencia 80 s y AI 3 cm) y 28 % de fibra (polvo B, tiempo de residencia 13 s y AI 5 cm). De esta forma, se evaluaría el efecto del cambio en la calidad interfacial sobre las propiedades de los materiales compuestos.

3.4. Proceso de impregnación.

El PP del polvo seleccionado fue colocado en la cámara de impregnación. Los parámetros como AI y presión de aire fueron ajustados. Posteriormente se introdujo un marco de aluminio con las fibras extendidas axialmente. La válvula de aire fue abierta y, una vez transcurrido el tiempo de residencia elegido, la válvula se cerró y se retiró el marco, que fue entonces introducido en un túnel de calentamiento para adherir el PP a las fibras. Las fibras impregnadas fueron retiradas del marco, y los extremos fuera de la zona de impregnación, cortados.

3.5. Laminado de fibras impregnadas

Las fibras impregnadas fueron laminadas con un molde acanalado de dos partes (Fig. 2) en una prensa térmica marca Carver. Este molde fue diseñado para generar laminados con terminales de sujeción de PP integrados, según las dimensiones definidas por la norma ASTM D3039-76, para pruebas a tensión de materiales compuestos fibro-reforzados (Fig. 3).

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las fibras y de la matriz termoplástica.

Propiedades	Twaron (Ramos, 2004)	Kevlar (Ramos, 2004)	Carbón (Ramos, 2004)	Polipropileno (May, 2002)
Módulo (GPa)	113.90	112.36	275	0.48
Esfuerzo (GPa)	3.65	3.72	5.03	0.044
Deformación (%)	2.85	2.90	1.80	684

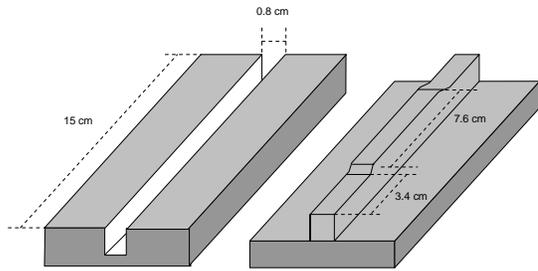


Fig. 2. Molde acanalado para el laminado de los materiales compuestos termoplásticos fibro-reforzados.

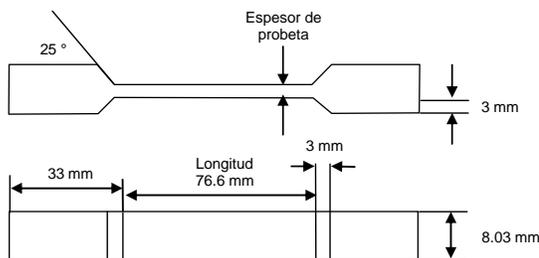


Fig. 3. Dimensiones de las probetas para las pruebas a tensión.

3.6. Caracterización mecánica.

Después del moldeo, las probetas fueron ajustadas puliendo las rebabas. El ancho y el espesor de cada probeta fueron medidos en 3 diferentes puntos de la zona de prueba para, así, obtener un valor promedio del área de la sección transversal. La prueba a tensión fue realizada en una máquina universal para pruebas mecánicas SHIMADZU modelo AG-1 según la norma ASTM D3039-76. Se empleó una celda de 5 KN y una rapidez de elongación de 1 mm/s.

4. Resultados y discusión

4.1. Impregnación de las fibras de ingeniería.

Cinco fracciones en peso de fibra fueron pre-seleccionadas para preparar los materiales compuestos (dentro del intervalo de 10 al 50 %), en consecuencia, fue necesario conocer los perfiles de impregnación de las fibras para elegir las condiciones de impregnación que permitieran alcanzar los niveles pre-seleccionados.

De trabajos previos se conocen los perfiles de impregnación de PP-fibra de PET (González y col., 2004) y se sabe que el tipo de fibra no afecta los perfiles de impregnación, estos sólo dependen del tipo de nube de polvo. El único cambio observable en los perfiles de impregnación, cuando se cambia de fibra, es la posición que ocupan sobre el eje y; esta posición depende del grado de afinidad entre el polvo y la fibra (González y col., 2005).

La Fig. 4a presenta la cantidad de matriz impregnada en la fibra de Twaron en función del

tiempo de residencia. 5 y 7 cm fueron las AI usadas con el polvo B; se observa el comportamiento típico: la cantidad de matriz impregnada es menor cuando la AI utilizada es alta (González y col., 2004). Una AI de 3 cm fue usada con el polvo A, con estas condiciones se obtuvo un intervalo de impregnación de aproximadamente 50 a 90 % de PP. El polvo A es la fracción de mayor abundancia obtenida durante el proceso de molienda y tamizado y abarca un amplio intervalo de porcentajes de impregnación, por lo que se decidió emplearlo en la manufactura de los materiales compuestos. Todos los perfiles muestran un máximo de impregnación en un tiempo aproximado de 40 s.

El comportamiento de impregnación de la fibra Kevlar se presenta en la Fig. 4b. El polvo B fue usado con las AI de 5 y 7 cm; una vez más, se observa que, al aumentar la AI, disminuye el porcentaje de impregnación. La AI de 7 cm condujo a un intervalo de impregnación entre 10 y 80 %, y la AI de 5 cm a uno de 50 a 90 %. Para el polvo B, a partir de 35 s de residencia la impregnación alcanzó un máximo (en este punto se inicia la saturación de la fibra con la matriz).

Los perfiles de impregnación de las dos fibras de aramida resultaron ser similares entre ellas, especialmente cuando se usó la misma fracción de polvo y la misma altura de impregnación (Figs. 4a y b), este comportamiento puede atribuirse a la similitud en características físicas y químicas entre las fibras. Por ejemplo, a una AI de 3 cm, los datos se sobrepone con la misma tendencia.

Los perfiles de impregnación de la fibra de carbón son presentados en la Fig. 4c. Se usó el polvo C (Tabla 1) ya que el diámetro de la fibra de carbón es más pequeño que el de las fibras de aramida - un polvo con diámetro de partícula muy grande respecto al diámetro de la fibra conduce a bajos porcentajes de impregnación, ya que las partículas son pesadas y la fuerza de atracción electrostática no es lo suficientemente fuerte como para retenerlas en la superficie de las fibras (González y col., 2005). Tres AI fueron usadas (Fig. 4c), se observa claramente que, al aumentar la AI, el porcentaje de matriz impregnada disminuye, de manera similar que en los sistemas a base de aramid. A tiempos de impregnación superiores a 25 s, se observa la aparición de una meseta que marca el inicio de la saturación de las fibras carbón con la matriz de PP.

Los perfiles aquí presentados, al ser comparados con los reportados para PP-fibra de PET en estudios previos (González y col., 2005), demostraron la universalidad de la nube de PP, ya que el proceso de impregnación fue similar para cada tamaño de polvo y AI, lo que condujo a niveles máximos de impregnación equivalentes; la única diferencia observada fue el intervalo de impregnación que, en general para las fibras de ingeniería, fueron más cerrados y más altos sobre el

eje y, lo cual nos dice que estas fibras mostraron una mayor afinidad con el PP.

De forma independiente, se hicieron pruebas preliminares de laminación que demostraron que las fibras impregnadas con un 50 % de PP no conducían a un material compuesto homogéneo; por lo que esta fórmula se eliminó del estudio.

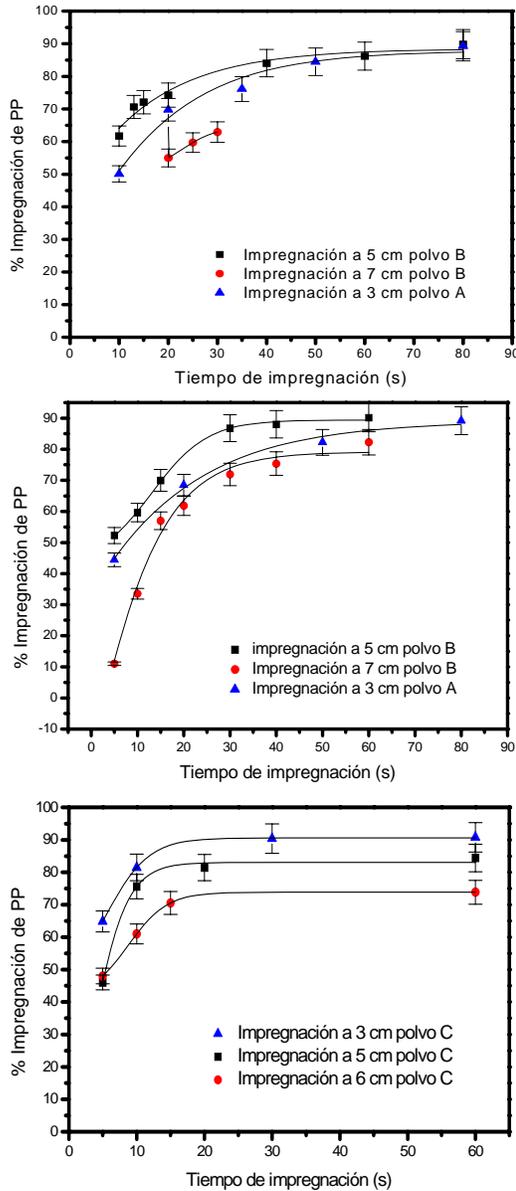


Fig. 4. Perfiles de impregnación para: a) PP-Twaron, b) PP-Kevlar y c) PP-Carbón.

4.2. Propiedades mecánicas de los materiales compuestos

Las curvas típicas esfuerzo-deformación de los materiales compuestos obtenidos (PP-Twaron, PP-Kevlar y PP-Carbón) se presentan en la Fig. 5. El comportamiento es casi lineal al inicio de la prueba

en los tres materiales compuestos (en el intervalo de 0 a 1 % de deformación). La relación esfuerzo-deformación de los materiales con fibras de aramida es parecida entre ellas, lo que corrobora la similitud de las fibras.

La curva esfuerzo-deformación del sistema PP-Carbón está por encima de las curvas correspondientes a PP-Twaron y PP-Kevlar. Esto se debe a las propiedades de la fibra de carbón, ya que se trata de un cerámico que se caracteriza por tener una elevada rigidez (Hull, 1981), en comparación con las fibras de aramida, que son materiales termoplásticos (Hull, 1981).

a)

b)

c)

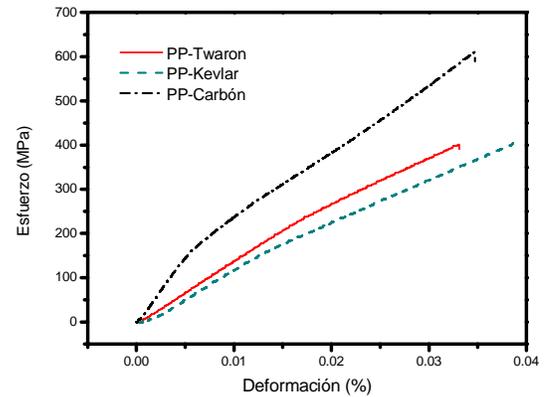


Fig. 5. Curvas esfuerzo-deformación típicas de materiales compuestos reforzados con fibras de ingeniería.

Las Figs. 6 y 7 muestran las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de PP reforzados con fibras de Twaron y Kevlar respectivamente. Se observa que las propiedades mecánicas (módulo y esfuerzo máximo) de estos materiales aumentaron en gran medida respecto a los de la matriz termoplástica. El aumento en el contenido de fibra de refuerzo provocó que la resistencia del material compuesto aumentara, pues la carga aplicada al material se distribuye en las fibras, que son el componente con mayor resistencia mecánica en el material compuesto. De esta manera, a mayor contenido de fibra, mayor fue la resistencia. El esfuerzo máximo del PP sin reforzar fue de 43.72 MPa y el esfuerzo máximo de los materiales compuestos, preparados (PP-Twaron y PP-Kevlar) con 40% en peso de fibra, resultó de aproximadamente 500 MPa, lo que corresponde sólo al 15% de la resistencia máxima de las fibras de aramida vírgenes (Tabla 2). Esta diferencia puede atribuirse a la baja resistencia interfacial entre la fibra y el PP, lo cual genera una falla interfacial prematura.

En las Figs. 6c y 7c se compara el porcentaje de deformación máximo de los materiales compuestos con la deformación del PP. A diferencia del esfuerzo y el módulo, la deformación de los materiales preparados es menor que la del PP. Los

materiales compuestos presentan una deformación máxima en un intervalo del 3 al 4 %, que es similar a la deformación máxima presentada por las fibras (Tabla 2). Por lo tanto, las propiedades mecánicas de las fibras gobernaron la falla de los materiales preparados.

El comportamiento mecánico de los materiales compuestos PP-Twaron y PP-Kevlar, como se esperaba, es muy parecido, ya que las fibras de aramida usadas como refuerzo poseen características físicas y químicas similares.

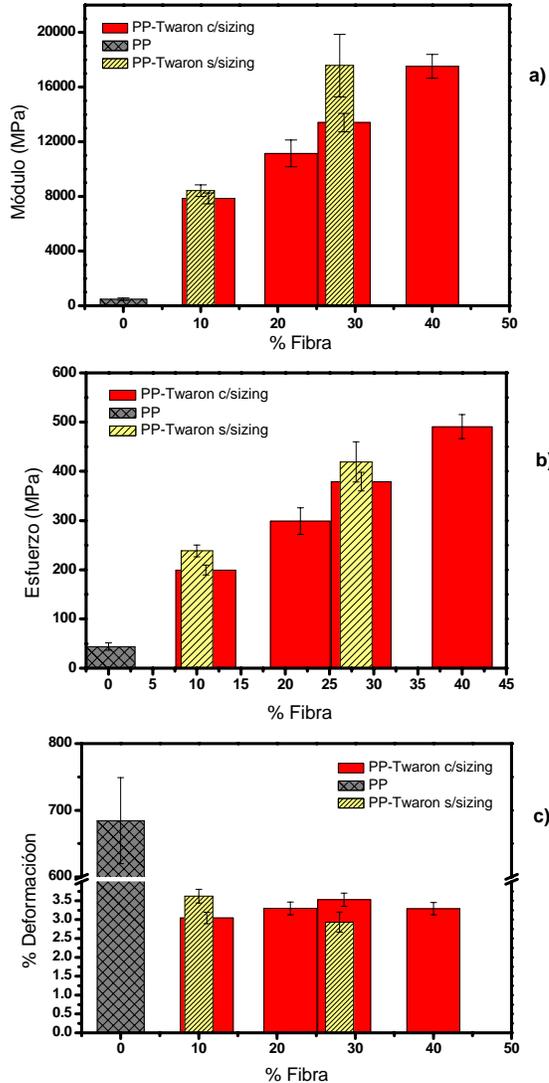


Fig. 6. Propiedades mecánicas a tensión de los materiales compuestos PP-Twaron. a) Esfuerzo máximo, b) Módulo elástico y c) % Deformación.

Los materiales compuestos hechos con la fibra sin “sizing” muestran un aumento relativo en sus propiedades, respecto a los preparados con fibras con “sizing” (Fig. 6); muy probablemente esto se deba a que existe una mejor interacción entre la fibra y la matriz. Sin embargo, la eliminación de este

recubrimiento debe ser evaluada desde un punto de vista económico, pues dicha eliminación se traduciría en un paso extra en el procesamiento de los materiales compuestos, resultando en una complicación del proceso, sin que conduzca a un gran aumento de la resistencia.

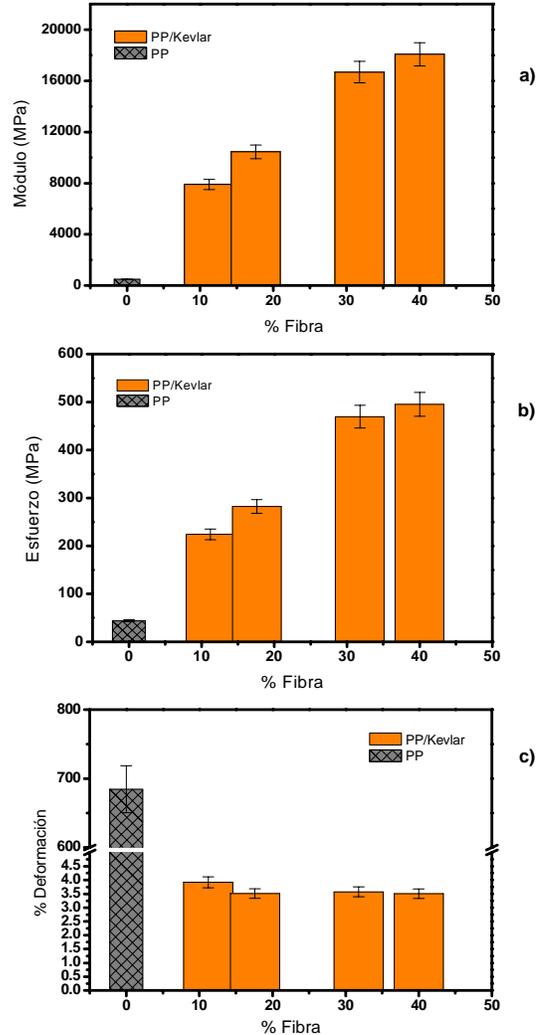


Fig. 7. Propiedades mecánicas a tensión de los materiales compuestos PP-Kevlar a) Esfuerzo máximo, b) Módulo elástico y c) % Deformación.

La Fig. 8 presenta las propiedades mecánicas de los materiales compuestos PP-Carbón. Su comportamiento es semejante al de los materiales de PP-Twaron y PP-Kevlar ya que el máximo esfuerzo y el módulo elástico aumentan con el contenido de fibra. En general, estos materiales compuestos presentaron una mejor resistencia y módulo elástico que los materiales a base de fibra de aramida. Por ejemplo, el esfuerzo máximo correspondiente al 40 % en peso de fibra es de aproximadamente 800 MPa (500 MPa para los materiales con fibras de aramida).

La deformación máxima, aparentemente no es afectada en gran medida por el contenido de fibra,

pues la deformación osciló en un intervalo de 2 a 4 %, valor cercano a la deformación máxima de la fibra de Carbón.

Los materiales compuestos preparados (PP-Carbón), aunque muy resistentes, son quebradizos, debido a que la fibra de Carbón es un cerámico con alta rigidez y gran fragilidad.

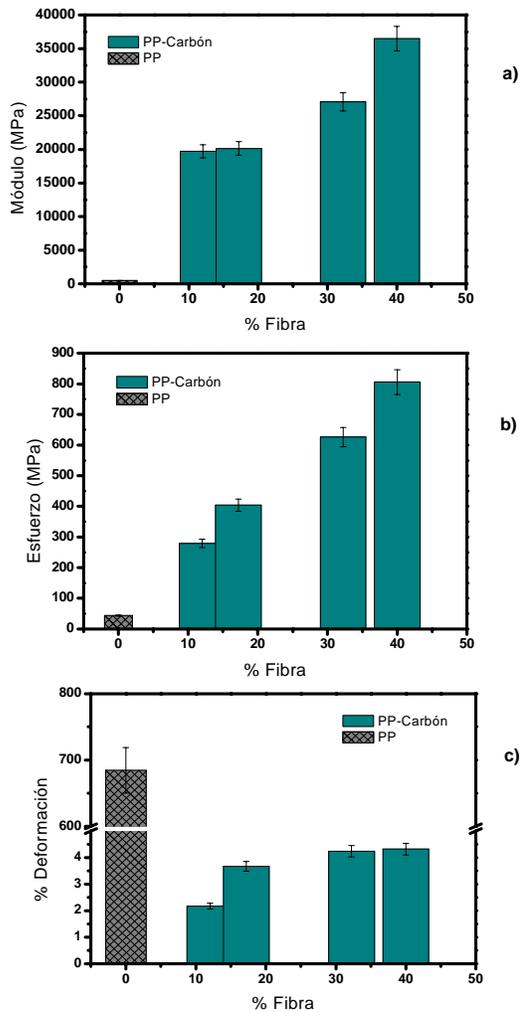


Fig. 8. Propiedades mecánicas a tensión de los materiales compuestos PP-Carbón. a) Esfuerzo máximo, b) Módulo elástico y c) Deformación.

Conclusiones

Los resultados del presente estudio demostraron la universalidad de los perfiles de impregnación de la nube de PP ya que se adaptaron perfectamente a las fibras de ingeniería, aun cuando originalmente fueron creados para la fibra de poliéster. Además, las fibras de ingeniería mostraron una mayor afinidad con el PP que la fibra de poliéster, conduciendo a niveles de impregnación mas elevados.

Durante el proceso de impregnación, el aumento de la altura de impregnación condujo a

niveles de impregnación menores y, de manera análoga, el aumento en el tamaño de partícula del polvo usado condujo a niveles de impregnación menores.

El método de impregnación por polvos aplicado a las fibras de ingeniería (Twaron, Kevlar y Carbón) demostró su capacidad para preparar exitosamente materiales compuestos termoplásticos reforzados unidireccionalmente, en un intervalo de 10 a 40 % en peso de fibra, por encima de este contenido de fibra los laminados eran mecánicamente pobres ya que no tenían suficiente matriz.

Los niveles de impregnación de las fibras de Twaron y Kevlar fueron muy parecidos entre ellos, lo que revela que el PP presentó el mismo nivel de adherencia con estas dos fibras, resultado de la similitud química de su estructura, que también condujo a su similitud mecánica.

El módulo de Young y el esfuerzo máximo de los materiales compuestos preparados superaron las propiedades mecánicas del PP como resultado del refuerzo causado por las fibras de ingeniería (Twaron, Kevlar y Carbón), sin embargo, la falla interfacial, redujo la transferencia de carga a niveles por debajo de la resistencia de la fibra.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos (PP-Twaron, PP-Kevlar y PP-Carbón) fueron regidas por las propiedades de las fibras: su deformación máxima fue similar a la deformación máxima de las fibras que al fallar generan fisuras internas en el material compuesto. El módulo y el esfuerzo máximo de los materiales aumentaron con el contenido de fibra ya que la carga aplicada a la probeta es transferida a la fibra, la fase mas resistente del sistema.

Los materiales con fibras de Carbón presentaron la mayor resistencia y el mayor módulo de Young; sin embargo, de entre todos los materiales preparados, fueron los menos flexibles.

La eliminación del recubrimiento (“sizing”) de las fibras de Twaron, promovió una mejora relativa de las propiedades mecánicas respecto a los materiales preparados con fibras con recubrimiento, lo que sugiere que su eliminación no es necesaria ya que solo complicaría el proceso de manufactura de los materiales compuestos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Felix Edgardo García Loeza por su colaboración en la conclusión del análisis a los materiales compuestos reforzados con fibras sin “sizing”.

Referencias

Baucom R.M., Marchello J.M. (1990). Powder prepreg system. 35th International SAMPE Symposium. California, 175-177.

- Bourban, P.E., Bogli, A., Bonjour, F., Manson, J.A. (1998). Integrated processing of thermoplastic composites. *Composites Science and Technology* 58, 633-637.
- Brown G.G. (1965). *Operaciones básicas de ingeniería química*. Ed. Marín S.A., Barcelona, 285-287.
- Cogswell, F.N. (1991). Processing and application of thermoplastic structural composites. *Makromol Chem. Makromol Symp.* 48/49, 165-176.
- Cowie J.M. (1991). *Chemistry & physics of modern materials*. Chapman and Hill. New York, Capítulo 1.
- Drzal, L.T., Shridahar, R. I. (1990). Manufacture of powder-impregnated thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 3, 325-355.
- González-Chi, P.I., Argaez-Canul, J.A., May-Hernández, L.H. (2005). Materiales compuestos termoplásticos unidireccionalmente reforzados con fibras continuas. *Revista de Plásticos Moderno* 90, 467-475.
- González-Chi, P.I., May-Hernández, L.H., Carrillo-Baeza, J.G. (2004). Polypropylene composites unidirectionally reinforced with polyester fibers. *Journal of Composite Materials* 38, 1521-1532.
- Hull D. (1981). *An Introduction to composite materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1-4.
- May Hernández, L.H. (2002). *Diseño y caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras textiles continuas*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Instituto tecnológico de Mérida, 49-67.
- Mena Tun, J.L. (2001). *Preparación y caracterización de materiales compuestos termoplásticos obtenidos a partir de fibras continuas de aramida*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Instituto tecnológico de Mérida, 66.
- Olson, S.H. (1990). Manufacturing with commingled yarns, fabrics and powder prepreg thermoplastic composite materials, 35th International SAMPE Symposium, California, April 2-5, 1306-1319.
- Ramos Torres, W. (2004). *Preparación y caracterización de materiales compuestos termoplásticos reforzados con fibras de ingeniería*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Instituto tecnológico de Villahermosa, 54-55.
- Rath, M., Kreuzberg, S., Hinrichsen, G. (1998). Manufacture of aramid fiber reinforced nylon-12 by powder impregnation process. *Composites, Part A* 29, 933-938.