

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO

MECHANICAL RESISTANCE STUDY OF POLYMERIC COMPOUND MATERIALS REINFORCED WITH CARBON FIBERS

**Enrique Rocha-Rangel¹, José A. Rodríguez-García¹, Enrique Martínez-Peña¹,
Elizabeth Refugio-García², Ana Leal-Cruz³ y Guillermo Munive³**

(1) Universidad Politécnica de Victoria, Av. Nuevas Tecnologías 5902, Parque Científico y Tecnológico de Tamaulipas, 87138 Ciudad Victoria, Tamaulipas - México

(2) Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa-Tamaulipas, 02200 México, D.F. - México

(3) Universidad de Sonora, Departamento de Ciencias Químicas-Biológicas y de Salud, Boulevard Luis Encinas y Rosales s/n, col. Centro, 83000 Hermosillo, Sonora - México

Recibido: 04/01/2011 - Evaluado: 01/03/2011 - Aceptado: 05/04/2011

RESUMEN

Materiales compuestos hechos de una resina epóxica reforzada con diferentes contenidos de fibra de carbono, fueron preparados por dos técnicas de laminación diferentes. Se aplicó 1 Kg/cm² de presión en los laminados, mientras, que otros laminados se sometieron a un vacío de 1 atm. De los resultados se tiene que las resistencias a la flexión y tensión de los compósitos son mejoradas con el aumento en el contenido de fibra en los mismos. Los compósitos resultantes presentan un mejor comportamiento mecánico bajo esfuerzos de tensión que cuando lo hacen bajo esfuerzos de flexión, debido a que en flexión las fibras se rompen eventualmente, provocando que el material falle a bajos valores de esfuerzo. Cuando los materiales compuestos son sometidos a tensión, las fibras transmiten los esfuerzos entre ellas y el material falla hasta que se acumula la energía necesaria para romper todas las fibras de una sola vez.

ABSTRACT

Compound materials made of an epoxy resin reinforced with different amounts of carbon fibers, were prepared by two different lamination techniques. The first one consists in the application of 1 Kg/cm² of pressure on the laminated materials, whereas, in the other laminated materials were put under a vacuum action of 1 atm. Results show that the flexion and tension strengths of composites are improved considerably with the increments in the carbon fiber content. Resulting composite materials show better mechanical behavior when they work under tension stresses rather than when they are exposed to flexion stress, because of under flexion testing, fibers eventually break leading the material to inevitable failure, at low stress level. When the compound materials are tested under tension, the carbon fibers transmit the efforts among them and the material fails until the necessary energy is accumulated to break all the fibers of a single time.

Palabras clave: resistencia mecánica; fibras de carbono; resina epóxica; laminados

Keywords: mechanical resistance; carbon fibers; epoxy resin; laminates

INTRODUCCIÓN

La necesidad de utilizar materiales cada vez más ligeros y a la vez más resistentes en ciertas aplicaciones como es el caso de la industria del transporte, ha provocado el requerimiento de nuevos materiales que sean capaces de trabajar bajo fuertes condiciones de esfuerzo tal y como lo indica Kopeliovich (2009). De acuerdo con Askeland y Phulé (2003) y Saxena (2000), los materiales compuestos son el resultado de una mezcla de dos materiales diferentes con el propósito de obtener en un solo material, con mejores características de los usados para su construcción. De acuerdo con Klaus et al. (2005), algunos de los materiales fabricados han sido estudiados en lo referente a sus propiedades mecánicas y físicas, así como también en lo relacionado a sus procesos de producción. Una combinación poco estudiada es aquella que emplea una resina epóxica con fibras de carbón para obtener un material compuesto el cual es ligero, dúctil y al mismo tiempo muy resistente mecánicamente. En términos de su resistencia mecánica, y degradación química, las resinas epóxicas, son las resinas de mayor desempeño según Hongwei et al. (2011). Estas características, le han permitido ser empleadas como componentes en la industria aeronáutica. Por otro lado, la fibra de carbono es un material ciertamente costoso pero con cualidades sorprendentes, ya que presenta un modulo de ruptura similar al del acero, sin embargo es 75 % más ligero que este metal tal (Vasilievna et al., 2004). Las fibras de carbono son cada vez más utilizadas en diversas aplicaciones, que pueden ir desde muy básicas hasta avanzadas debido a su elevada resistencia mecánica y a la posibilidad de que pueden ser empleadas como material de refuerzo. El método de producción de materiales compuestos (Resina epóxica/fibra de carbono) no se encuentra bien documentado y claramente expuesto.

Es por este motivo que la presente investigación se hace con el propósito de establecer una ruta de procesamiento y caracterización de materiales compuestos resultantes de la combinación de una resina epóxica con diferentes contenidos de fibras de carbón.

METODOLOGÍA

Los materiales fueron preparados cortando lienzos de la fibra de carbono y luego recubriendo estos con la resina. A continuación una serie de estos materiales fueron colocados en una cámara a la que se le aplicó vacío de una atmósfera. Mientras que otra serie se colocó en una nueva cámara y ahí se les aplicó una presión de 1Kg/cm^2 , en ambos casos el tiempo de duración del tratamiento fue de 1 h. De los materiales obtenidos, la mitad de cada serie fue llevada luego de su secado al aire, para medición de sus propiedades mecánicas, mientras que la otra mitad fue tratada térmicamente mediante un proceso de curado, el cual consistió en calentar las muestras a $60\text{ }^\circ\text{C}$ durante 1 h una vez frías las muestras se evaluaron sus propiedades mecánicas. La evaluación de propiedades mecánicas; resistencia a la flexión y resistencia a la tensión se hizo de acuerdo a las normas ASTM-D790 (2010) y ASTM D638 (2010) respectivamente. En la Tabla 1 se presenta las condiciones de preparación de cada muestra. Cabe mencionar que de cada serie se fabricaron 5 muestras y el valor reportado en los resultados de propiedades mecánicas es el promedio de las 5 mediciones.

Tabla 1: Condiciones de laminado y ensayo mecánico aplicado en cada muestra de estudio.

Muestra	Proceso de laminado	% de fibra de carbono
10V	Vacío	10
20V	Vacío	20
30V	Vacío	40
40V	Vacío	60
10P	Presión	10
20P	Presión	20
40P	Presión	40
60P	Presión	60
S9	---	0

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resistencia a la Flexión

En la Figura 1 se puede observar el efecto del contenido de fibra en la resistencia a la flexión de los materiales compuestos fabricados. Como puede verse en todos los casos en la medida que aumenta la cantidad de fibra en el compósito su resistencia mejora de manera considerable. Por lo que se puede decir que la fibra de carbono actúa efectivamente como un material de refuerzo de la resina epóxica tal y como también lo aseveran Ahmed et al. (2010). Otra observación en esta figura es que la deformación de los compósitos es muy similar, independientemente del método de procesamiento en todos los casos en que se usan fibras de carbono como material de refuerzo. Mientras que la deformación en el material sin refuerzo es mayor, aunque la resistencia de este último es considerable menor en comparación con la de los materiales reforzados. Esta deformación mayor que tiene el material puro indica un comportamiento principalmente elástico del mismo y aunque en las curvas correspondientes no se observa el límite de cedencia de ninguno de los materiales, si se puede suponer que en los materiales sin refuerzo no existe una deformación plástica, de ahí los bajos valores de resistencia obtenida por estos. Por otro lado, la deformación plástica en los materiales compuestos debe existir y, aunque esta sea pequeña es suficiente como para mejorar de manera considerable la resistencia de cada material de estudio, la existencia de este comportamiento elástico-plástico en los materiales reforzados (Ferenc, 2011) tiene su origen en las fibras utilizadas como materiales de refuerzo.

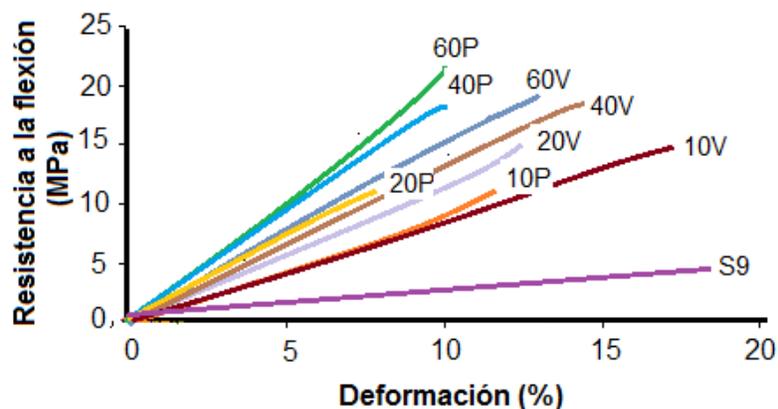


Fig. 1: Curvas esfuerzo-deformación para los ensayos de flexión de los materiales fabricados bajo diferentes condiciones de procesamiento.

En la Figura 2 se presenta un diagrama de columnas, construido al tomar los valores más altos de resistencia a la flexión obtenida para cada una de las series estudiadas para aquellas muestras con contenidos de 60% de fibra, por ser estas muestras las que presentan los valores mayores de resistencia a la flexión. De esta figura se tiene que el aumento de la resistencia a la flexión de las muestras, cuando se les agrega fibras de carbono como material de refuerzo, es evidente ya que como se puede observar la resistencia a la flexión de la muestra de la S9, que corresponde a aquella resina sin refuerzo se encuentra muy por debajo (4 MPa) de todas las demás muestras. La muestra con mayor resistencia a la flexión es la 60P (23 MPa) que corresponde a la condición de procesamiento aplicando presión y sin curado. En la figura también se observa que los valores de resistencia en aquellos materiales procesados con la aplicación de vacío es similar, sin importar si la muestra posteriormente fue curada o no, ya que los valores de resistencia desplegados por estas muestras fueron de 21 y 18 MPa respectivamente. Situación que no se presenta cuando las muestras fueron procesadas con la aplicación de presión, ya que aquí el valor de la resistencia a la flexión de aquella muestra que fue curada está muy debajo (12 MPa) de las demás muestras incluyendo aquellas a las que se les aplicó vacío. De estos resultados se puede indicar que el curado de las muestras no mejora la resistencia a la flexión de estos materiales, toda vez que

como ya se discutió anteriormente, y como puede verse en la Figura 2, que el efecto de esta operación no es significativo. Aquí cabe recordar, que durante la preparación de los materiales de estudio la resina es combinada con un agente catalizador, el cual mediante una reacción química se endurece con el tiempo y el único propósito del curado es acelerar la acción del catalizador en el endurecimiento de la resina, por lo que se puede decir que con el tiempo de secado que se les dio a estas muestras de 24 h, a temperatura ambiente es suficiente para que las mismas desplieguen sus mejores propiedades mecánicas, siendo innecesario entonces el curado de las muestras. Por otro lado, se tiene de la Figura 2 que la aplicación de presión durante el procesamiento de las muestras resulta más efectiva en el sentido de conseguir una mejor adherencia entre la resina y la fibra que si utiliza vacío, al menos para las condiciones aquí estudiadas. Seguramente aquí, por efecto de la presión, hubo una mejor mojabilidad de las fibras de carbono por la resina, y esto ayuda en una buena transmisión de los esfuerzos a través de la resina a las fibras, cuando la muestra se encuentra bajo la acción de un esfuerzo de flexión (Drakonakis et al., 2010). Esto se ve reflejado en un incremento de la resistencia a la flexión del material. Otro factor importante a considerar aquí, es que con la aplicación de presión, resultó más sencillo la extracción del aire atrapado por la resina durante el vaciado de las muestras, en comparación del proceso en el que se aplicaba vacío. La ausencia de aire en la muestra permite tener un material más continuo en su masa y por consiguiente con menos lugares (poros) para la generación y crecimiento de grietas.

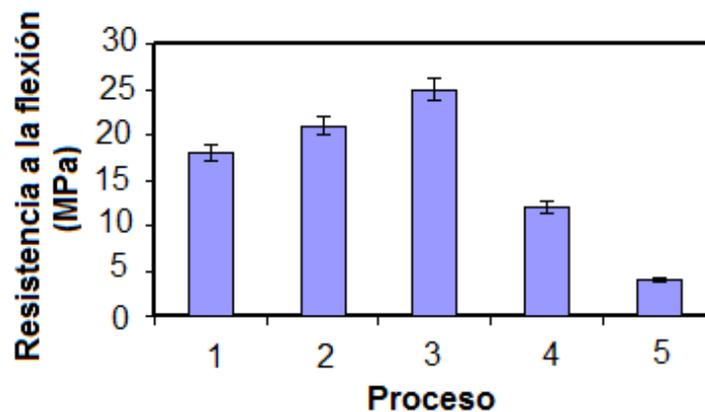


Fig. 2: Diagrama de barras donde se presentan los valores más altos de resistencia a la flexión obtenida para cada una de las series estudiadas para aquellas muestras con contenidos de 60 % de fibra. 1.- Vacío sin curado, 2.- Vacío con curado, 3.- Presión sin curado, 4.- Presión con curado y 5.- Resina sin refuerzo.



Fig. 3: Fotografías de tres probetas ensayadas a flexión, mostrando los daños producidos durante el ensayo. Muestra 60P.

Las probetas de flexión al ser ensayadas presentan una deformación permanente, a pesar de que se llega a fracturar la resina que rodea a las fibras de carbono. Por otro lado, no todas las fibras del material compuesto se rompen, ocurriendo esto únicamente en el lado opuesto al que se aplicó la carga. Por lo que el material no se fractura por completo. En la Figura 3 se puede ver marcas hechas en la probeta durante el ensayo, asimismo, se puede apreciar que la resina fue fracturada en la zona de aplicación de la fuerza, y las fibras de carbono presentan un daño menor que de la resina. Aquí se tiene que las fibras se rompen por capas sin llegar a fracturarse todas, de manera tal que el material no llega a separarse por completo.

Resistencia a la Tensión

En la Figura 4 se puede observar el efecto del contenido de fibra sobre la resistencia a la tensión en los materiales compuestos fabricados. El mismo comportamiento que tiene el contenido de fibra sobre la resistencia a la flexión, se presenta en este tipo de material cuando es sometido a esfuerzos tensiles. Es decir que en la medida que se incrementa el porcentaje de fibra en el compuesto su resistencia se ve mejorada ampliamente. Al igual que en el caso anterior la fibra de carbono actúa efectivamente como un material de refuerzo de la resina epóxica. Sin embargo, el comportamiento de la deformación en los materiales cuando se encuentran o no reforzados es diferente a lo que se presenta cuando se aplican esfuerzos de flexión, ya que en este caso la deformación de las muestras con 10 y 20 % de fibras de refuerzo es similar entre sí, y además mayor a la deformación de aquellos materiales con 40 y 60% de fibras de carbono como material de refuerzo. La causa de esta diferencia es la misma que se explica cuando se analizan los resultados de resistencia a la flexión.

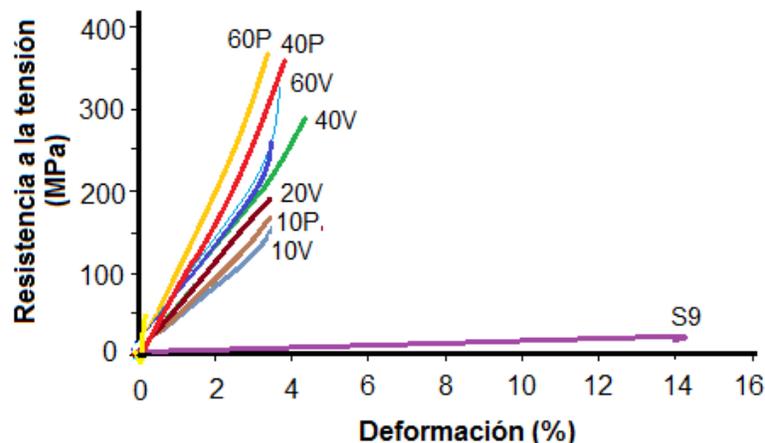


Fig. 4: Curvas esfuerzo-deformación para los ensayos de tensión de los materiales fabricados bajo diferentes condiciones de procesamiento.

Al igual que en el caso de los ensayos de flexión, se construye un diagrama de columnas tomando los valores más altos de resistencia a la tensión obtenida para cada una de las series estudiadas, para aquellas muestras con contenidos de 60% de fibra, por ser estas muestras las que presentan los valores mayores de resistencia a la tensión, este diagrama de columnas se presenta en la Figura 5. Resulta evidente el incremento en la resistencia a la tensión de los compósitos con el aumento en la cantidad de la fibra de carbono. Como se puede observar la resistencia a la tensión de la muestra testigo (S9) se localiza muy por debajo (8 MPa) de todas las demás muestras. La muestra que presenta la mayor resistencia a la flexión es la 60P (351 MPa), que corresponde a la condición de procesamiento aplicando presión y sin curado, que es el mismo caso del estudio de resistencia a la flexión. Asimismo, se observa que los valores de resistencia en aquellos materiales procesados con la aplicación de vacío es muy similar, sin importar si la muestra posteriormente fue curada o no, ya que los valores de resistencia desplegados por estas muestras fueron de 336 y 326 MPa respectivamente. Situación que no se presenta cuando las muestras fueron procesadas con la aplicación de presión, ya que aquí

el valor de la resistencia a la tensión de aquella muestra que fue curada está muy debajo (208 MPa) de las demás muestras, incluyendo aquellas a las que se les aplicó vacío. Estos resultados resultan interesantes ya que el efecto que tienen las condiciones de procesamiento sobre las propiedades evaluadas (resistencia a la flexión o resistencia a la tensión) es muy similar, lo que refuerza el análisis de resultados previo. De aquí que nuevamente se puede decir que la etapa de aplicación de curado no parece tener un efecto positivo en la resistencia a la tensión de estos materiales. De la figura 5 se concluye que la aplicación de presión durante el procesamiento de las muestras resulta más efectiva en el sentido de conseguir una mejor adherencia entre la resina y la fibra que si utiliza vacío, por ser esta la muestra que mayor resistencia a la tensión desplegó.

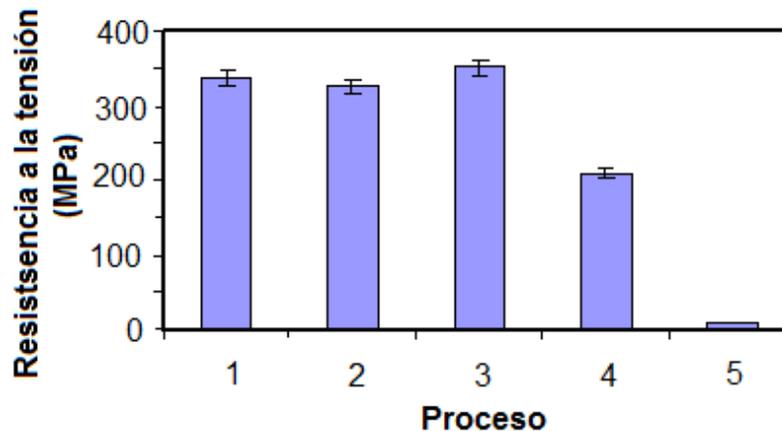


Fig. 5: Diagrama de barras donde se presentan los valores más altos de resistencia a la tensión obtenida para cada una de las familias estudiadas para aquellas muestras con contenidos de 60% de fibra. 1.- Vacío sin curado, 2.- Vacío con curado, 3.- Presión sin curado, 4.- Presión con curado y 5.- Resina sin refuerzo.

Comparando los valores de resistencia a la flexión y de tensión obtenidos en cada una de las muestras, se podrá distinguir que el comportamiento de los materiales reforzados en general es mucho mejor en un estado de tensión, que si encontrara en flexión ya que la resistencia de los materiales bajo esfuerzos de tensión es hasta 10 veces mayor que cuando se encuentra bajo esfuerzos de flexión. Este mismo efecto se manifiesta desde que se ensaya la resina pura, en donde la resistencia a la tensión es del doble de la resistencia a la flexión. Aquí se puede destacar la importancia que tiene la dirección en que se aplica el esfuerzo, ya que cuando se hace en condiciones de flexión, el fenómeno que ocurre es que primeramente se fractura la resina y luego poco a poco se van rompiendo las diferentes capas de fibras y, si bien aquí estos materiales no fueron separados por completo, si fallan a valores bajos de esfuerzo. Caso contrario se tiene cuando ocurren esfuerzos de tensión en estos materiales, en donde con la aplicación del esfuerzo las fibras no se rompen poco a poco y el material aquí falla cuando se rompen por completo todas las fibras, situación que se ve reflejada en altos valores de resistencia a la tensión de los materiales poliméricos reforzados con fibras de carbono. De esto mismo se entiende la mayor resistencia de aquellos materiales con mayor contenido de fibras, en donde por tener más fibras se requiere un mayor esfuerzo para romper todas estas.

Durante el ensayo de tensión se tiene que las fibras de carbono trabajan en paralelo, lo que les permite trabajar todas juntas repartiéndose el esfuerzo uniformemente a través de ellas, motivo por el cual se logran obtener valores más elevados de resistencia a la tensión. Estas probetas son fracturadas en forma violenta y las fibras de carbono se rompen de manera abrupta y en forma simultánea provocando la fractura separando en dos partes por completo la probeta. La fractura en las probetas ocurre en cada tramado de fibras, el cual no se da en el mismo punto en cada laminado como se muestra en la Figura 6. Lo que confirma que las fibras trabajan en conjunto aumentando la resistencia del material fabricado situación que también ha sido descrita por Shady y Gowayed (2010).

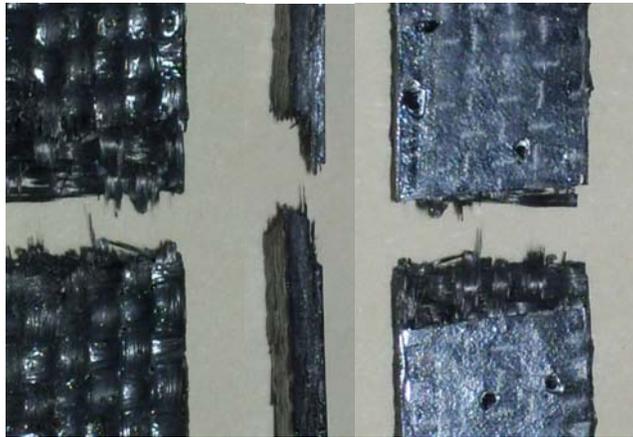


Fig. 6: Aspecto de una probeta ensayada por tensión permitiendo ver la fractura de la misma. Muestra 60P.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos, es posible concluir que:

- La resina al ser reforzada con fibra de carbono aumenta considerablemente su resistencia. En los ensayos de flexión la resistencia a la flexión aumento de 4.48 MPa a 25.28 MPa, lo que significa un aumento mayor a 500% de la resistencia del material compuesto resultante. En este ensayo se pudo observar que las fibras fueron fracturadas por lienzo o laminado, debido a que se produjo un radio de deformación inducido por la fuerza aplicada en la probeta, provocando que el lienzo que está más alejado del punto de aplicación se deforme más sin llegar a fracturarse.
- Los resultados de la resistencia a la tensión indican que hay un aumento de 8.36 MPa a 351 MPa en la misma, cuando la resina es reforzada con 60% de fibras de carbono, este cambio representa un aumento de más del 4000% de la resistencia a la tensión de la resina.
- EL mejor proceso de laminación para obtener el material compuesto es en el que se aplica presión (cámara barométrica).
- El tratamiento de curado de los materiales compuestos fabricados no tiene un efecto significativo en las resistencia de los mismos, motivo por lo cual no se recomienda como parte del proceso de fabricación.
- El contenido de fibra que resulto más adecuado para obtener la mayor resistencia es de 60% de fibra en peso de la probeta.

REFERENCIAS

- Ahmed, A.; Fahim, A.; Naguib, H.E. (2010); *Load bearing properties of three-component polymer composites*. Polymer Composites. 31(10), 1731-1737.
- Askeland, D.R.; Phulé, P. (2003); *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 4^a. ed., Thomson, p. 115.
- ASTM D638 (2010); American Society of Testing Materials, Tensile properties of plastics.
- ASTM-D790 (2010); American Society of Testing Materials, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

- Drakonakis, V.M.; Velisaris, C.N.; Seferis, J.C.; Doumanidis, C.; Wardle, B.L.; Papanicolaou, G.C. (2010); *Matrix hybridization in the interlayer for carbon fiber reinforced composites*. Polymer Composites: 31(11), 1965-1976.
- Ferenc, R. (2011); *Influence of short glass fiber reinforcement on the morphology development and mechanical properties of PET/HDPE blends*. Polymer Composites: 32(4), 586-595.
- Hongwei, H.; Kaixi, L.; Jianlong, W.; Jian, W.; Jianyu, G.; Renjie, L. (2011); *Effects of novolac resin modification on mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites*. Polymer Composites: 32(2), 227-235.
- Kopeliovich, D. (2009); *Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites*, NCHRP Report, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=carbon_fiber_reinforced_polymer_composites.
- Klaus, F.; Stoikoand, F.; Zhong, Z. (2005); *Polymer Composites: from nano-to-macro-scale*, Springer science + bussines media Inc., 147-160.
- Saxena, S.A. (2000); *Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería*, 1° ed., CECSA, p. 13.
- Shady, E.; Gowayed, Y. (2010); *Interlaminar shear stress distribution between nested layers of plain weave composites*. Polymer Composites: 31(11), 1838-1845.
- Vasilievna, O.K.; Robledo, C.L.; Ortíz, U.M. (2004); *Síntesis de nanoestructuras de carbono mediante microondas*. Ingenierías: 7(23), 6-13.