

Fabricación y caracterización mecánica de un laminado de fibra de carbono en matriz de resina epoxi

Manufacturing and mechanical characterization of a laminated made of carbon fiber in epoxy resin matrix.

Alexander Paz Carvajal, Luis Miguel Rios Gamboa, Gonzalo Fernando Casanova García, Arlex Leyton, José Jaime García Álvarez

Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali, Colombia
Correo-e: Gonzalo.casanova@correounivalle.edu.co

Resumen— En Colombia están poco extendidos los conocimientos sobre la manufactura de materiales compuestos fibro-reforzados y sus propiedades mecánicas. Este estudio piloto con vigas de materiales fibro-reforzados se realizó con el fin de evaluar el módulo de elasticidad de un material compuesto con matriz polimérica tipo epoxi y fibras de carbono. Este compuesto será posteriormente utilizado en el desarrollo de un fijador externo para transporte de huesos. Se describe el procedimiento para la fabricación de los prototipos mediante el procedimiento hand lay-up variando el número de capas de fibra de carbono para variar así la relación volumétrica de la fibra. El módulo de elasticidad se obtuvo experimentalmente mediante pruebas de flexión en tres puntos con base en la norma ASTM D7264 y también se calculó teóricamente utilizando el módulo de elasticidad de los componentes (fibra y resina) y la ley de mezclas.

Tanto el módulo de elasticidad obtenido experimentalmente como el obtenido teóricamente, aumentaron linealmente al aumentar la cantidad de fibra en el compuesto. Los módulos de elasticidad experimentales fueron menores que los obtenidos teóricamente, lo cual podría atribuirse a arrugas o incorrecto alineamiento de la tela generado durante la manipulación dentro del molde. También podría deberse a una posible incompleta adhesión entre las fibras y la resina.

Palabras clave— Fibroreforzado, compuesto, rigidez, fijador externo.

Abstract— The knowledge about manufacturing and the resulting mechanical properties using fibro-reinforced material is currently limited in Colombia. This preliminary study using beams made of fiber reinforced material was undertaken to evaluate the elastic modulus of the composite material, which will be subsequently used to design an external fixation system for bone transportation. Specimens were made of carbon fiber fabric using epoxy resin as the matrix. A hand lay-up manufacturing process varying number of carbon fiber layers was implemented to evaluate different fiber volumetric ratios. The elastic modulus was experimentally obtained by performing bending tests based on the ASTM D7264

standard. Also, the elastic modulus was theoretically calculated using the rule of mixtures.

The experimental and theoretical elastic modulus was lineally increased for increasing the volumetric fiber ratio. However, the experimental results were considerably smaller than the theoretically obtained results, which might be produced by a possible presence of wrinkles or misalignment of the fabric produced during the handling inside the mold. It could be also produced by incomplete adhesion between the fiber and the resin.

Key Word —Fibro reinforced, composite, stiffness, external fizador.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de fijación externa para el tratamiento de fracturas óseas son herramientas de uso diario en las salas de trauma de los hospitales de Colombia [1]. En años recientes, la tendencia de los sistemas comerciales es utilizar materiales reforzados con fibra de carbono [2-4], debido a que tienen bajo peso comparados con metales de uso quirúrgico, buen comportamiento mecánico y son translúcido, las cuales son propiedades deseables tanto para el paciente como para el traumatólogo. Infortunadamente, el costo de los sistemas importados es prohibitivo para un alto porcentaje de pacientes en Colombia. Es conveniente entonces realizar desarrollos propios que permitan el diseño y construcción de estos sistemas en nuestro país.

En Colombia son escasos los estudios sobre procesos de manufactura de elementos estructurales para aplicaciones biomédicas con materiales fibro-reforzados. Caicedo et al. [5] evaluaron la resistencia mecánica y la tenacidad de un material compuesto reforzado con fibras de carbono continuas y discontinuas desarrollado para cascos de bicicleta. Encontraron

que el compuesto con fibras continuas tiene mejores propiedades que el compuesto con fibras cortas. Las propiedades elásticas no fueron reportadas en dicho trabajo. En un trabajo previo, desarrollamos un riel para sistema de fibra de carbono [6]. Sin embargo, en dicho estudio sólo se evaluaron las propiedades finales del producto, mas no se evaluaron las propiedades del material compuesto utilizado.

Para tener un mayor acercamiento a las variables que determinan las constantes elásticas del material compuesto de resina y fibras de carbono, en el presente trabajo se construyeron vigas rectangulares pequeñas con el método de hand-lay up y posterior compresión en molde. Se caracterizó el módulo de elasticidad efectivo a flexión en tres puntos y se comparó con el obtenido mediante un análisis teórico del material compuesto. Resultados de este estudio servirán de insumo para desarrollar el material compuesto a ser utilizado en la construcción de una prensa de fijador externo para transporte óseo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Un material compuesto fibro-reforzado está formado por una matriz que en la mayoría de casos es un polímero, reforzada con fibras de diversas longitudes que pueden ser de vidrio, carbono, kevlar, etc. Esto permite obtener propiedades mecánicas mejoradas en comparación con el uso de un solo material homogéneo [7]. Algunas de las ventajas que se logran son [8]:

- Aumento de la resistencia y el módulo de elasticidad específico hasta tres veces con respecto a las del acero para un compuesto de epoxi con fibras de carbono.
- Reducción de peso, lo que los hace adecuados para aplicaciones biomédicas y aeroespaciales.
- El coeficiente de expansión térmica es menor en comparación con los materiales convencionales, lo que permite conservar las dimensiones cuando se presentan grandes cambios de temperatura.

Por otro lado, algunas desventajas que tienen este tipo de materiales son [8]:

- Alto costo de fabricación comparado con materiales de ingeniería como los metales.
- La complejidad del diseño ya que las propiedades mecánicas dependen de la distribución de las fibras de refuerzo.
- Baja tenacidad y dificultad para conformar juntas, en comparación con los metales.
- Dificultad para encontrar defectos como fracturas o grietas, así como la complejidad para la reparación.

Las fibras de carbono están compuestas por miles de filamentos de 5 a 15 μm de diámetro cada uno. Con un conjunto de fibras continuas se pueden manufacturar telas con las fibras

orientadas unidireccionalmente u orientadas en dos o más direcciones [7].

La matriz polimérica puede ser termoplástica o termoestable. Los polímeros termoplásticos son aquellos que se funden al ser sometidos a temperaturas por encima de su punto de fusión y se solidifican al descender la temperatura recuperando sus propiedades originales. Los polímeros termoestables por su parte solidifican por efecto de una reacción química donde aumenta su peso molecular. Esta reacción química es irreversible lo que implica que el material no puede ser fundido al aumentar su temperatura sino que se quema [9]. Los materiales termoestables, entre los que se encuentran las resinas epoxi, poliéster, poliamidas y fenoles, son las más ampliamente utilizadas en los materiales fibro-reforzados [9]. La resina epoxi es muy utilizada en la industria porque permite una gran variedad de aplicaciones con las siguientes ventajas [10]:

- Tienen mejores propiedades mecánicas que otras resinas termoestables como las de poliéster y éster de vinilo.
- Tienen mayor resistencia a la absorción de humedad y a los líquidos corrosivos.
- Poseen una alta resistividad eléctrica y buen rendimiento a temperaturas elevadas comparadas con la temperatura de deformación por calor de las matrices de poliéster.
- Presentan una adhesión óptima a las fibras de vidrio, de carbono y de kevlar.
- Poseen una contracción durante el curado de 5% del volumen inicial comparado con las resinas de poliéster y éster de vinilo que encogen hasta un 12%.

Proceso de fabricación

Para realizar los prototipos de vigas se seleccionó una tela de fibra de carbono plana 3K referencia HexForce 282 (Hexcel Corporation, Stamford, CT, USA), en la cual las fibras siguen un patrón de orientación en las direcciones 0° y 90° . Según el fabricante [11], esta tela tiene una densidad de área (ρ_A) de 197 g/cm^2 , un espesor de 0,26 mm , una resistencia a tensión de 3650 MPa y un módulo de elasticidad de 234 GPa . Para la matriz se seleccionó la resina epoxi 744 que se consigue en el mercado local así como el catalizador. El proveedor no entregó las propiedades de la resina, así que fue necesario caracterizarla mediante ensayos mecánicos como se describe más adelante.

El proceso de manufactura seleccionado fue el de Hand Lay-Up [12] el cual empieza con la aplicación de resina a un trozo de tela inicialmente conformado con la geometría de la viga. Luego se aplica otra capa de tela y este proceso se repite hasta completar cierto volumen. Este material se introduce en un molde que permite aplicar presión para eliminar burbujas de aire y dar a la pieza la forma final.

Se fabricó un molde de aluminio para fabricar piezas de 2x 25x300 mm (Fig. 1). Este material se escogió ya que se encontraron perfiles extruidos comerciales de bajo costo

comparado con el acero inoxidable. Además, gracias a su capa de óxido, el aluminio ofrece un acabado final de la probeta adecuado. En el Anexo se muestra el plano general del molde que está compuesto por dos partes, el macho o pistón y la hembra. Para la construcción del pistón se tuvo en cuenta que el espesor final de la pieza fuera al menos cuatro veces menor que el macho para garantizar la presión uniforme durante el proceso de curado. Las dos partes del molde se fijaron por medio de tornillos de cabeza hexagonal.

Para desmoldar la pieza se seleccionó cera en pasta para aplicaciones con resinas de poliéster y otros materiales [13]. El proceso de manufactura se realizó a temperatura ambiente. El proceso inició con el corte de la tela de FC con tijeras para obtener tres trozos de $150 \times 320 \text{ mm}$, $225 \times 320 \text{ mm}$ y $300 \times 320 \text{ mm}$ con el fin de obtener las tres vigas de seis, nueve y 12 capas, respectivamente. Posteriormente se preparó el área de trabajo limpiando con un paño el molde y aplicando cera con un cepillo hasta que no quedaran grumos.

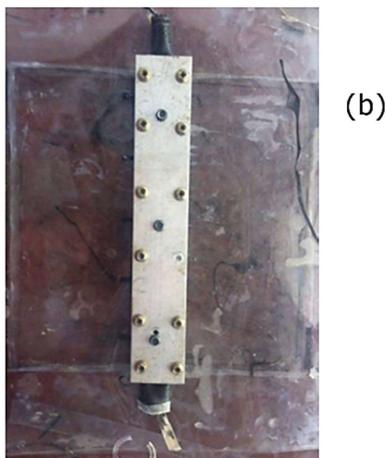
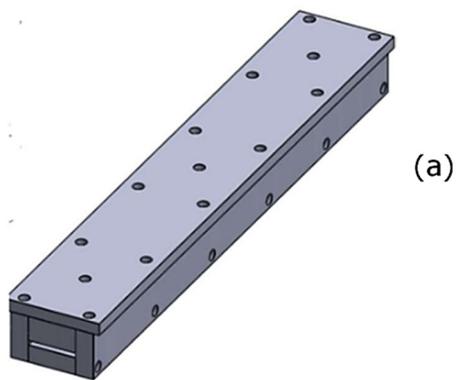


Fig.1. Molde para producir las probetas. a) CAD del molde, b) Molde ensamblado y en uso.

La matriz fue preparada con una proporción de 80% de resina y 20% de catalizador. Se procedió a aplicar la resina a la tela con una brocha de $\frac{1}{2}$ " y se fue envolviendo en forma de rollo 6, 9 y 12 veces dependiendo del tipo de viga. El compuesto fue

presado en el molde con ayuda de los tornillos ubicados en la parte superior para realizar el proceso de curado. El proceso de fabricación completo duró en promedio 12.3 minutos y el tiempo de curado fue de 24 horas a la temperatura, presión y humedad ambiente de Cali.

Las probetas obtenidas (Fig. 2) muestran un buen acabado superficial y algunos defectos localizados debido al contacto con la cera. Las probetas originales de 300 mm se cortaron en tres partes iguales para obtener probetas de 100 mm de longitud, las cuales fueron marcadas según el número de capas y la posición en la viga (extremos o centro). La máquina herramienta utilizada para el corte fue una sierra sin fin. En la Fig. 3 se muestran las probetas listas para realizar los ensayos mecánicos. Adicionalmente, en el mismo molde se produjeron cuatro probetas de resina pura (sin fibra) que fueron sometidas a pruebas mecánicas para obtener las propiedades de la resina.

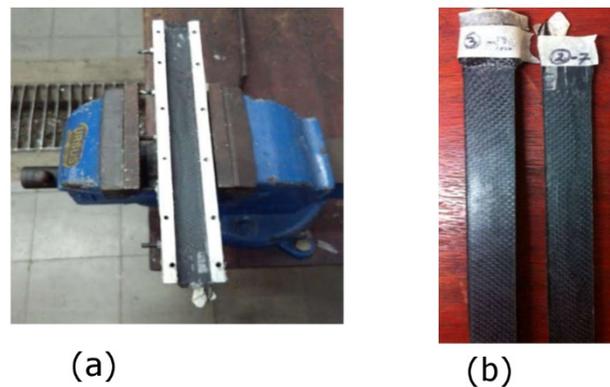


Fig. 2. a) Probetas en proceso de desmoldeo. b) Probetas después desmoldadas.



Fig. 3. Probetas cortadas y listas para ensayos mecánicos.

Pruebas mecánicas

Con base en la norma ASTM D7264 las probetas se sometieron a pruebas de flexión en tres puntos como se muestra esquemáticamente en la Fig. 4a. La probeta está simplemente apoyada en sus dos puntos extremos separados a 80 mm mientras que en el tercer punto central se aplica la carga. Las pruebas se realizaron en una máquina universal en la cual se aplicó un desplazamiento máximo de un milímetro, con la

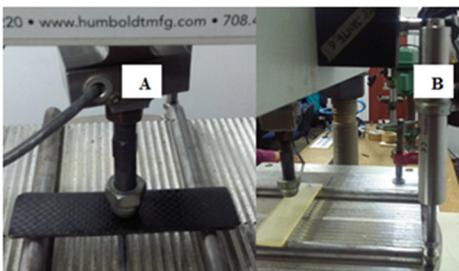
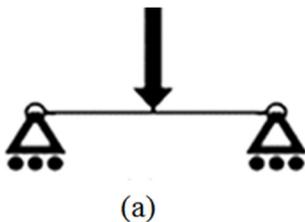
intención de caracterizar la zona lineal elástica del material y no producir daño en la probeta. El desplazamiento se midió con un LVDT modelo LD340 de marca Omega [14] colocado entre la meza móvil y la meza fija de la máquina. La fuerza se midió con una celda de carga con capacidad de 50 kg modelo LCM703-50 marca Omega [15] (Fig. 4b). Se repitió el procedimiento para ambas caras de las vigas. Los datos se registraron con una tarjeta de adquisición de datos modelo i430 incluida en una caja de tarjetas de InstruNet i400 [16], que permitió almacenar en un ordenador los parámetros detectados para ser procesados según lo recomienda la norma ASTM D7264. Según esta norma, el esfuerzo (σ) en la cara exterior de las vigas en la mitad de la distancia entre los apoyos, se calcula en función de la fuerza aplicada mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{3PL}{2ah^2} \quad (1)$$

donde P es la fuerza aplicada, L es la distancia entre apoyos, a es el ancho de la viga y h es su espesor. Adicionalmente, se calculó la deformación (ε) en el centro con base en la siguiente ecuación (ASTM D7264):

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (2)$$

donde δ es la deflexión en el punto medio entre apoyos y las otras variables ya fueron definidas. El módulo de elasticidad se determinó como la pendiente de la zona lineal de la curva esfuerzo-deformación. La norma recomienda que la pendiente sea tomada en un rango de 0.002 mm/mm comprendido entre 0.001 y 0.003 mm/mm.



(b)

Fig. 4. Ensayo de flexión. a) representación esquemática, b) fotografía de una probeta durante el ensayo mostrando la celda de carga (A) y el LVDT (B) utilizados. Se midió el desplazamiento de la meza móvil con respecto a la meza fija de la máquina.

Planteamiento teórico

Las vigas se analizaron utilizando la teoría clásica de placas [17], según la cual, en un laminado simétrico sin fuerzas en el plano de la viga, la relación entre momentos flectores y curvaturas está dada por:

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = -[D] \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde w es la deflexión de la placa, x, y son las coordenadas que definen la posición de un punto de la placa y las componentes de la matriz $[D]$ son función de las constantes elásticas y de la orientación de cada capa [17].

Ya que en este estudio se utilizó una tela tejida con fibras a 0 y 90°, tanto el módulo de elasticidad como la relación de Poisson en las dos direcciones son iguales: $E_1 = E_2 = E$, $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$; y por lo tanto:

$$G_{12} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

Adicionalmente, en todas las capas la tela se colocó alineada con la dirección longitudinal de las vigas. Por lo tanto el sistema local coincide con el global. El módulo de elasticidad E de cada capa fue calculado de acuerdo con las relaciones volumétricas así [17],

$$E = V_f E_f + V_m E_m \quad (5)$$

donde V_f y V_m son las relaciones volumétricas de la fibra y la matriz respectivamente; E_f y E_m son los módulos de elasticidad de la fibra y la matriz respectivamente. La constante ν del compuesto fue asumido igual a 0.06 de acuerdo a información proporcionada en [17] para tela tejida de fibra de carbono en matriz de resina epoxi.

La relación volumétrica de la fibra fue calculada así,

$$V_f = \frac{N\rho_A}{h\rho_V} \quad (6)$$

donde N es el número de capas, ρ_V es la densidad volumétrica de las fibras, la cual fue igual a 1,46 g/cm³, medida con el procedimiento descrito en [17] y ρ_A es la densidad de área de la tela.

La relación volumétrica de la resina está dada por:

$$V_m = 1 - V_f \quad (7)$$

Finalmente, de acuerdo con [18], el módulo elástico efectivo (E^b) de las probetas fue calculado como:

$$E^b = \frac{12}{h^3 D_{11}^*} \tag{8}$$

donde D^* corresponde a la inversa de la matriz $[D]$ de la Ecuación (3).

III. RESULTADOS

Las probetas de resina presentaron un comportamiento lineal elástico en las condiciones de ensayo. Para estas probetas se encontró un módulo de elasticidad promedio de 16,1 MPa con una desviación estándar de 0,27.

Las probetas de material compuesto también presentaron un comportamiento elástico lineal (Fig. 5) en todas las pruebas.

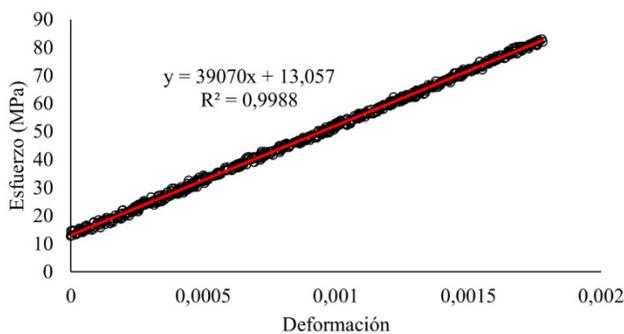


Fig. 5. Diagrama típico de Esfuerzo vs Deformación obtenido para una probeta de 6 capas que describe un comportamiento lineal. La línea roja corresponde a una recta de tendencia de los datos en todo el rango de ensayo.

En la Tabla 1, además de los módulos de elasticidad teóricos y experimentales, se muestran la relación volumétrica de fibra, la desviación estándar y la diferencia porcentual entre el módulo de elasticidad teórico y el experimental. Al realizar un análisis de varianza se encontró que existe diferencia significativa entre los módulos de elasticidad promedio para 6, 9 y 12 capas.

Los módulos de elasticidad experimentales promedio fueron 54%, 63% y 66% menores que los teóricos para las probetas con seis, nueve y doce capas, respectivamente (Fig. 6). Los módulos de elasticidad tanto teóricos como experimentales aumentaron con el número de capas (Tabla 1).

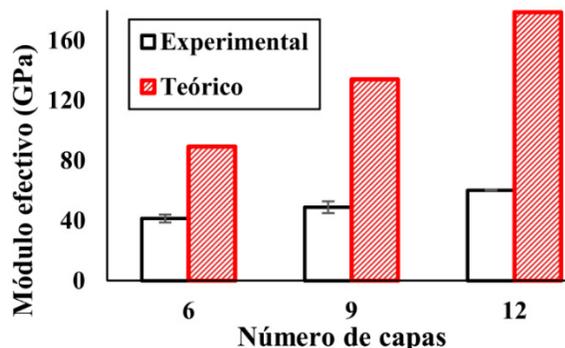


Fig. 6. Módulo de elasticidad efectivo experimental y teórico.

Tabla 1 Módulos de elasticidad efectivos (GPa) obtenidos experimental y analíticamente.

Número de capas	V_f	Exp. Promedio	Desviación estándar	Teórico	Diferencia (%)
6	0,38	41,42	2,61	89,3	54
9	0,57	48,95	3,87	134,0	63
12	0,76	60,28	0,28	178,7	66

IV. DISCUSIÓN

Como se esperaba, el módulo de elasticidad obtenido para la resina (16,1 MPa) fue considerablemente menor que el de la tela de fibra de carbono (234 GPa según el fabricante).

Los módulos efectivos tanto teóricos como experimentales, presentaron una dependencia lineal con el número de capas o, lo que es equivalente, con la relación volumétrica de la fibra. Sin embargo, los módulos experimentales fueron significativamente inferiores a los que predice el modelo teórico. Esta baja rigidez experimental puede ser debida a la presencia de poros o falta de adherencia entre la resina y la fibra. También podría deberse a la presencia de arrugas o mal alineamiento de la tela producida durante la manipulación del compuesto dentro del molde. Este aspecto podría ser mejorado si se aplica una precarga a la tela en dirección longitudinal, para mantener todas las fibras alineadas. Adicionalmente, en el modelo teórico se asumió una distribución homogénea de la fibra y la resina lo cual en la práctica es difícil de lograr incluso para geometrías sencillas como las evaluadas en este estudio, ya que con el proceso de manufactura utilizado, no se puede garantizar que todas las capas de resina tengan el mismo espesor. Este factor afecta de forma substancial el módulo, ya que la cantidad de resina entre las capas de fibra determina sus distancias hasta el centro de la viga lo cual afecta significativamente la rigidez. Con esta misma idea se puede explicar el hecho de que la dispersión en el módulo de elasticidad fue menor para el máximo número de capas evaluada. Este resultado puede ser atribuido a la homogeneidad en la separación de capas que sería de esperarse cuando disminuye la cantidad de resina.

En un sistema de fijación externa, la geometría es más compleja que la evaluada en este estudio. Sin embargo, los resultados del presente estudio son de utilidad para tener un módulo de elasticidad aproximado en función de la relación volumétrica de fibra. Dichas geometrías complejas tendrán una cantidad de fibra variable en el volumen y por lo tanto será necesario hacer una estimación local de la relación volumétrica y con esta, tener una estimación local del módulo de elasticidad en las regiones de interés.

V. CONCLUSIONES

- Se evidenció un comportamiento lineal entre el esfuerzo y la deformación en todas las pruebas, para el rango en el que fueron llevadas a cabo las pruebas.
- En el rango evaluado, tanto los resultados experimentales como los teóricos mostraron una relación aproximadamente lineal entre el número de capas y el módulo elasticidad efectivo del material compuesto.
- Los resultados experimentales fueron considerablemente menores que los obtenidos con el modelo teórico. Por lo tanto, con el modelo teórico se obtuvieron resultados no conservadores los cuales no pueden ser utilizados para el diseño de piezas con este material.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle, mediante el proyecto "Desarrollo de un sistema de fijación externa para transporte de huesos" CI 847, de la convocatoria interna 3 de 2015.

REFERENCIAS

- [1]. A. Martínez, M.A. Insuasty, and S. Mera, "Characterization of patients with diaphyseal open tibial fractures at El Valle (Colombia) University Hospital," *I Revista Colombiana de ortopedia y traumatología*, vol. 28, Num. 2.01, pp. 46-54, Jun 2014. Doi: 10.1016/j.rccot.2015.02.001
- [2]. M. Migliaresi, F. Nicoli, S. Rossi, and A. Pegoretti, "Novel uses of carbon composites for the fabrication of external fixators," *Composite Science and Technology*, 64, pp. 837-883, 2004. Doi:10.1016/j.compscitech.2003.09.003
- [3]. M.G. Lee, K. Chung, C.J. Park, J. Kim, T.J. Kang, and J.R. Youn, "The viscoelastic bending stiffness of fiber-reinforced composite Ilizarov C-rings," *Composite Science and Technology*, 61, pp. 2491-2500, 2001. Doi:org/10.1016/S0266-3538(01)00172-5
- [4]. S. Ramakrishana, J. Mayer, E. Witermantel, and K.W. Leong, "Biomedical applications of polymer-composite materials: a review," *Composite Science and Technology*, 61, pp. 1189-1224, 2001. Doi: org/10.1016/S0266-3538(00)00241-4
- [5]. J.C. Caicedo, L. Ipaz, O. Vanegas, W. Aperador, A. Cundar, and S. Delvasto, "Diseño y caracterización de un compuesto fibroreforzado de matriz polimérica y fibra de carbono como modelo en la implementación de cascos para ciclismo," *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 3, pp. 1127-1132, 2009.
- [6]. F. Ortega, A. Leyton, F. Casanova, "Design and evaluation of a rail made of carbon fiber reinforced material for an external fixation system," *Dyna*, 79, No. 174, pp. 40-45, 2012.
- [7]. D. Gay, S.V. Hoa, S.W. Tsai, *Composite Materials: Design and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2003, pp. 3-9.
- [8]. A.K. Kaw, *Mechanics of composite materials, 2a ed.* Boca Raton: CRC Press, 2005, p. 1-16.
- [9]. V. K.L. Edwards, "An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes," *Materials and design*, 19, pp. 1-10, 1998. Doi:org/10.1016/S0261-3069(98)00007-7
- [10]. V. Fiore, A. Valenza, *Epoxy resins as a matrix material in advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites*, Woodhead Publishing, Editors: J Bai, pp. 88-121.
- [11]. <http://www.hexcel.com/sp/ACarbon-Fiber>, Consultado el 6 de diciembre de 2016.
- [12]. F. Campbell, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, 2004
- [13]. (2017) Compositesshop. [Online]. Available: <http://compositesshop.com/desmoldeantes/13-ceraglass-cera-desmoldeante.html>
- [14]. (2015) Omega Engineering. [Online]. Available: <http://es.omega.com/pptst/LD340.html>
- [15]. (2017) Omega Engineering. [Online]. Available: <http://es.omega.com/pptst/LC703.html>
- [16]. (2017) GW Instruments, Inc. [Online]. Available: http://gwinst.com/products/index.html#i4xx_cards, consultado el 25 de enero de 2017.
- [17]. I. M. Daniel, O. Ishai, *Engineering mechanics of composite materials*, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford, 2006.
- [18]. J.N. Reddy, *Mechanics of Laminated composite plates and shells theory and analysis*, 2nd ed., CRC press, Boca Raton, 2004, p. 168.