

Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y sintéticas

Víctor H. Guerrero, Patricia Pontón, Andrés Tamayo, Héctor Villacís, Favio Delgado, Salomé Galeas

Departamento de Materiales
Escuela Politécnica Nacional
Quito, Ecuador
salome.galeas@epn.edu.ec

Abstract— En este estudio se exponen los resultados de la caracterización mecánica de materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales y sintéticas. Se obtuvieron compuestos de matriz poliéster mediante estratificación manual, para lo cual se emplearon como refuerzos: fibra de abacá, fibra de cabuya y refuerzos híbridos de fibra de abacá/vidrio y fibra de coco/vidrio. Se estudió la influencia de la variación de las fracciones volumétricas y configuraciones de los refuerzos en las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos. La evaluación de estos compuestos se realizó mediante ensayos de tracción, flexión e impacto según normas ASTM.

Palabras clave – materiales compuestos; resina termoestable; fibras naturales; refuerzos híbridos.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos materiales nace de la necesidad de obtener elementos con propiedades inexistentes en la naturaleza. Los materiales compuestos son el producto de la combinación de materiales simples con diferentes características, cuyas propiedades son mejores que las de los constituyentes de manera individual. Los materiales compuestos están formados por dos fases la matriz y el refuerzo. La matriz es el lugar donde se encuentra alojado el refuerzo y distinguible a simple vista por ser un medio continuo. La matriz otorga al compuesto ductilidad, tenacidad y transmite los esfuerzos inducidos a los refuerzos para que estos soporten la mayor parte de la fuerza aplicada. A la matriz se suele adicionar refuerzos de otros materiales en forma de: fibras, whiskers, partículas, etc., con la finalidad de elevar las propiedades mecánicas de ésta. Los refuerzos determinan la estructura interna de los materiales compuestos, por lo que deben estar fuertemente unidos a la matriz [1], [2]. Las propiedades de un material compuesto dependerán de los materiales que lo constituyen, de su distribución e interacción [3], [4].

Los compuestos pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de matriz. Así se tienen compuestos de matriz metálica, cerámica y compuestos de matriz polimérica. La aplicación a la que se va a destinar el material compuesto dicta la matriz que se debe escoger. La mayoría de compuestos poliméricos tradicionales emplean matrices termoestables [5]. Estas resinas termoestables son líquidos viscosos que por efecto de una

reacción de endurecimiento forman una gran red molecular integrada por una serie de enlaces cruzados entre cadenas moleculares que dan forma a un sólido que no puede ser reprocesado. El curado se da por el desprendimiento de calor interno (reacción exotérmica) o por calor inducido. Estas resinas son normalmente isotrópicas, es decir que las propiedades son idénticas en todas las direcciones. Su propiedad más característica es su respuesta al calor ya que no se funden al calentarlas, pero pierden su rigidez a la temperatura de distorsión térmica, que define un límite superior efectivo para su uso en componentes estructurales. Esta característica es una desventaja puesto que los polímeros termoestables no pueden ser reciclados y reutilizados, ya que han sufrido modificaciones en su estructura química y a nivel molecular [6], [7]. La resina termoestable más utilizada en todo el mundo es la poliéster, que fue empleada como matriz en esta investigación.

Por otra parte, la inclusión de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos ha sido estudiada ampliamente en las últimas dos décadas. En la actualidad se producen aproximadamente 30 millones de toneladas de fibras naturales alrededor del mundo y sus aplicaciones tradicionales son: la cordelería, vestido, tapicería, entre otros [8]. Recientemente son utilizadas en el campo de materiales compuestos de matriz polimérica para la elaboración de partes interiores de automóviles [9]. El interés actual en utilizar fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos se debe a la creciente preocupación por la preservación del medio ambiente, además, existe un gran interés en la búsqueda de fibras naturales que puedan reemplazar adecuadamente a las fibras sintéticas, como la fibra de vidrio o combinarlas con éstas para la obtención de materiales compuestos altamente competitivos [10].

En el Ecuador se produce gran variedad de fibras naturales. La cabuya es una de ellas. Esta planta crece a lo largo del callejón interandino y se ha aprovechado en nuestro país desde hace cientos de años para la obtención de fibra textil debido a su resistencia y durabilidad. Se comercializa en una gran variedad de hilos y tejidos en cuanto a colores y tamaños. Su disponibilidad en el mercado local, así como también la uniformidad y consistencia de los tejidos hace de esta fibra un potencial refuerzo de materiales compuestos.

El abacá es una planta similar a la planta de banano, pero completamente diferente en sus propiedades y usos. Es nativo de las Filipinas y en los años 40 fue introducido al Ecuador, excelente lugar para el cultivo de abacá por las condiciones climáticas de las zonas tropical y sub-tropical de las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas, Manabí, Los Ríos y Cotopaxi. La planta de abacá tiene un ciclo de vida perenne, con un periodo de producción de 15 a 20 años. Tarda de 18 a 24 meses en producir fibra, luego de eso el producto puede ser cosechado cada 2 o 3 meses [11], [12]. Esta fibra es mucho más resistente a la degradación en agua salada que la mayoría de fibras vegetales [10], [13], [14], razón por la cual ha sido empleada en la fabricación de sogas para buques, papel moneda, bolsas para té [8], entre otros. Además, su alta resistencia mecánica ha captado la atención de la industria para su inclusión como refuerzo de materiales compuestos.

A pesar de que las fibras con mayor demanda internacional son las fibras de cabuya, algodón y abacá, se considera que en el Ecuador existe una extensa variedad de fibras, especialmente a nivel de especies exóticas de la Costa y Amazonía que no son explotadas y que podrían atender los requerimientos de los mercados extranjeros [15]. Tal es el caso de la fibra de coco que puede ser extraída de las cáscaras de este fruto, que actualmente se consideran desechos.

En la Tabla I se presentan las propiedades físicas y mecánicas de algunas fibras naturales.

TABLE I. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS FIBRAS NATURALES [16].

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a la ruptura (%)
Sisal	1,27-1,50	126-800	3,80-62,0	2,8-10
Coco	1,15-1,50	95-149	2,80-13,7	3,3-5,1
Yute	1,50	320-500	12,0-100	1,3-2,8
Malva	1,41	160	17,4	5,2
Ramio	1,51	393-900	7,30-25,0	1,8-5,3
Abacá	1,30	307	19,79	-

Frente a la trascendencia de las potenciales aplicaciones de las fibras naturales en la producción de nuevos materiales, este trabajo pretende obtener materiales compuestos de matriz termoestable reforzados con fibras naturales y sintéticas mediante el proceso de estratificación con el fin de determinar las formulaciones de los compuestos que exhiban las mejores propiedades mecánicas, con miras a utilizar estos resultados como una guía en trabajos posteriores destinados a la elaboración de productos prototipo a ser empleados en aplicaciones estructurales e industriales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales y equipos

Se utilizaron fibras naturales producidas en el Ecuador como refuerzos de los materiales compuestos. La fibra de abacá de la variedad Tangongón Rojo, grado de calidad 3, fue proporcionada por un productor de la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas. Se empleó la fibra de abacá en las siguientes configuraciones: fibra corta de 10 y 20 mm, fibra continua, tejido plano y tejido sarga. La fibra de coco fue extraída de cáscaras recolectadas de los principales mercados de Quito, mientras que la fibra de cabuya en forma de tejido normal fue adquirida en la sierra norte del Ecuador. El mat de fibra de vidrio utilizado fue de la marca Du Tranpro y está constituido por fibras tipo E y C.

Como matriz termoestable se empleó resina poliéster insaturada, fabricada por la empresa SUIN S.A., que a su vez fue diluida con estireno monómero. Como iniciador del proceso de curado de la resina se utilizó octoato de cobalto al 12% p/p y como catalizador peróxido de metil-etil cetona (MEKP). Finalmente, como agente de desmoldeo se usó cera desmoldante Simoniz. Todos los productos mencionados fueron suministrados por la empresa TRECX S.A.

Se emplearon moldes de acero tipo macho-hembra para la elaboración de probetas de material compuesto. Los moldes fueron construidos según las especificaciones de las normas ASTM para ensayos de tracción. Para la aplicación de presión se utilizó una prensa calefactora hidráulica manual de 12 toneladas de capacidad.

Para la caracterización de probetas se utilizó la máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen modelo H25KS y una máquina para ensayos de impacto por caída de dardo. Además se emplearon varias herramientas y equipos tales como: balanza analítica, analizador de humedad, sierras, calibrador, micrómetro, entre otros.

B. Metodología experimental

Se fabricaron moldes de acero inoxidable para elaborar probetas de material compuesto para ensayos de tracción, flexión e impacto de acuerdo a las normas ASTM D3039-08, ASTM D7264M-07 y ASTM D5628-10 respectivamente. Las dimensiones nominales de las probetas para ensayos de tracción fueron 2.5x25x250 mm, para los ensayos de flexión 4x13x160 mm y para los ensayos de impacto se escogió la geometría FE de 58 mm de lado y espesor 2 mm.

Las probetas de material compuesto se obtuvieron mediante el proceso de estratificación manual. La resina poliéster fue diluida con estireno monómero. Se adicionó octoato de cobalto y peróxido de metil etil cetona MEKP a la resina diluida. Las fibras de refuerzo fueron embebidas en esta solución y se depositaron en los moldes previamente recubiertos con cera desmoldante. Se aplicó una presión de 1000 psi a los moldes en una prensa manual hidráulica durante una hora, transcurrido este tiempo las probetas fueron desmoldadas. Los materiales obtenidos mediante este método se detallan en las Tablas II y III. La Tabla II muestra los compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales mientras la Tabla III los compuestos híbridos.

TABLE II. COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES.

Refuerzo	Configuración de la fibra	Fracción volumétrica de refuerzo
Abacá	Fibra corta de 5 mm	0.20
	Fibra corta de 10 mm	0.25
	Fibra continua longitudinalmente orientada	0.30
	Fibra continua longitudinalmente orientada	0.35
Cabuya	Fibra continua longitudinalmente orientada	0.23
	Fibra continua longitudinalmente orientada	0.39
	Tejido orientado a 45°	0.28
	Tejido orientado a 45°	0.34
	Tejido orientado a 0°	0.28
	Tejido orientado a 0°	0.34
	Tejido alternado orientación 0 y 45° (temperatura ambiente, 15 días)	0.34
	Tejido alternado orientación 0 y 45° (40°C y 16 horas)	0.34
	Tejido alternado orientación 0 y 45° (40°C y 24 horas)	0.34
	Tejido orientado a 0° (sin estireno)	0.34
Tejido alternado orientación 0 y 45° (sin estireno, curado a temperatura ambiente, 15 días)	0.34	
Tejido alternado orientación 0 y 45° (sin estireno, curado a 40°C y 24 horas)	0.34	

TABLE III. COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTER.

Refuerzo	Configuración de la fibra	Fracción volumétrica de refuerzo	Porcentaje relativo de refuerzos
Abacá/ Vidrio	Fibra corta de 10 mm	0.15 0.20	Fn 100 / Fv 0
	Fibra continua longitudinalmente orientada		Fn 75 / Fv 25
	Tejido plano		Fn 50 / Fv 50 ^a
	Tejido sarga		Fn 25 / Fv 75
Coco/ Vidrio	Fibra corta	0.10 0.15	Fn 0 / Fv 100

a. Fn50/Fv50 significa 50% de fibra natural "Fn" y 50% de fibra de vidrio "Fv"

Las probetas obtenidas fueron caracterizadas mecánicamente mediante ensayos de tracción, flexión e impacto, según las normas ASTM D3039-08, ASTM D7264M-07 y ASTM D5628-10, respectivamente. Los ensayos de impacto fueron realizados únicamente a los materiales que presentaron las mejores combinaciones de propiedades mecánicas. Cabe señalar que los ensayos mecánicos se realizaron transcurridas al menos 2 semanas a partir de su fabricación, para asegurar una reticulación mayor al 90%.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Refuerzo de fibra de cabuya

En la Figura 1 se presentan las curvas de esfuerzo vs. deformación a tracción de seis materiales compuestos reforzados con fibra de cabuya.

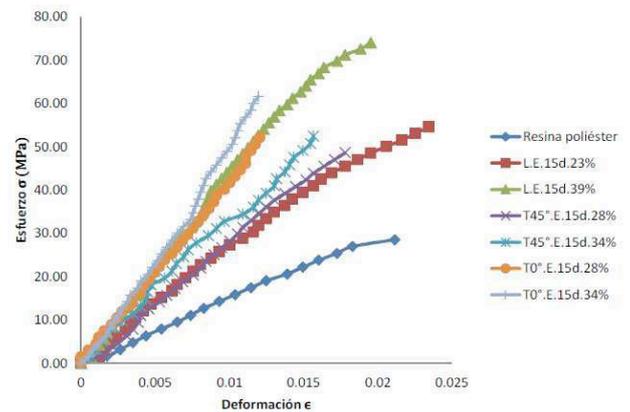


Figure 1. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya.

En la figura anterior se puede apreciar que existe un aumento en el esfuerzo máximo a tracción en las configuraciones de mayor fracción volumétrica de refuerzo y una disminución en las de menor fracción volumétrica. En cuanto al módulo elástico existió un incremento considerable respecto al módulo de la matriz de resina poliéster, para todos los compuestos siendo los de mayor fracción volumétrica los que muestran un mayor aumento. Es importante indicar que los materiales compuestos elaborados con tejido mostraron incrementos mayores en el módulo de elasticidad que los materiales compuestos fabricados con fibra continua longitudinal. Estos resultados se complementan con los de elongación a la ruptura, puesto que en este caso el aumento en la rigidez del material se tradujo en la disminución de su capacidad de elongarse.

B. Refuerzo híbrido de fibra de abacá / fibra de vidrio

En la Figura 2 se observan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas mediante ensayos de tracción de las mejores formulaciones de los materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y vidrio.

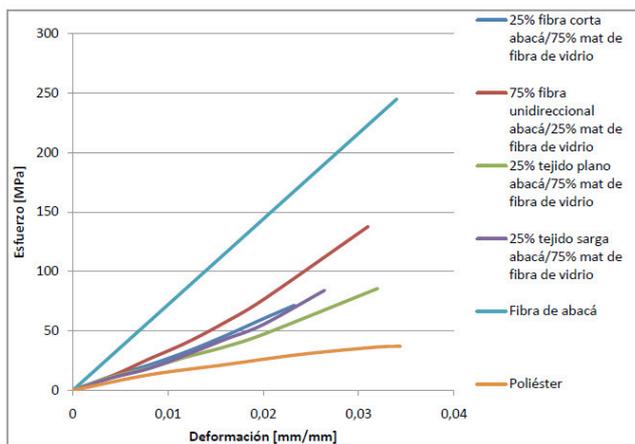


Figure 2. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá y fibra de vidrio.

De la figura se puede notar el efecto del refuerzo de los refuerzos híbridos en la matriz, incrementando sus propiedades mecánicas. Resalta la curva del 75% de fibra longitudinal de abacá y 25% fibra de vidrio. Además se debe señalar las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos de tracción son lineales.

Además de los resultados se observó una diferencia considerable en el esfuerzo máximo a la ruptura y el módulo de elasticidad entre la fibra orientada longitudinalmente y el resto de formulaciones. Sin embargo, en la deformación presentó un valor inferior, esto se puede explicar por la rigidez que adquirió el material con este tipo de refuerzo, reflejada en el módulo de elasticidad elevado

C. Refuerzo híbrido de fibra de abacá / fibra de vidrio

En la figura 3 se observan las curvas esfuerzo vs. deformación de los materiales híbridos de poliéster reforzados con fibra de coco y vidrio con una fracción volumétrica de 0.20.

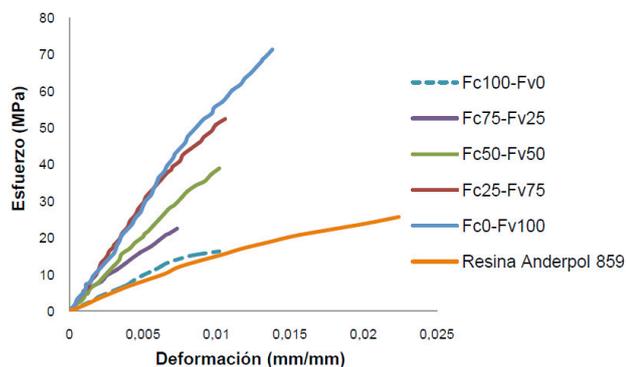


Figure 3. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de coco y fibra de vidrio.

Las curvas de esfuerzo vs. deformación demuestran que existen aumentos del módulo elástico y esfuerzo máximo conforme se incrementa la fracción de fibra de vidrio y disminuciones en las propiedades al adicionar fibra de coco. Las curvas presentaron linealidad a lo largo de toda la curva, lo cual sugirió el cálculo de un solo módulo, el de Young.

D. Comparación de materiales

En las Tablas IV y V se detallan los valores de los esfuerzos máximos y los módulos a tracción, flexión e impacto para la matriz poliéster y los materiales compuestos obtenidos que presentaron las mejores propiedades mecánicas.

TABLE IV. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES A TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE.

Material	Tracción (MPa)		Flexión (MPa)	
	Esf.max.	Módulo	Esf.max.	Módulo
Poliéster	37.2	1786.2	60.4	1671.0
Poliéster + f. continua abacá (0.20)	88.6	4270.9	100.5	3557.3
Poliéster + F vidrio (0.20)	75.5	3404.9	125.3	5631.0
Poliéster + F continua abacá50/ F vidrio50 (0.20)	93.5	2456.6	127.7	5544.8
Poliéster + F coco50/F vidrio50 (0.15)	38.6	3960.0	89.2	3432.0
Poliéster + F cabuya Tejido alternado orientación 0 y 45°, curado a 40°C y 16 horas (0.34)	60.6	6508.2	76.3	4434.0

TABLE V. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO PARA COMPUESTOS DE MATRIZ TERMOESTABLE.

Material	Fracción volumétrica	Energía absorbida (J)
Poliéster	----	0.07
Poliéster + f. continua abacá	0.30	0.34
Poliéster + f. corta abacá	0.30	0.40
Poliéster + F vidrio	0.20	0.51
Poliéster + F continua abacá75/ F vidrio25	0.20	0.49
Poliéster + F coco50/F vidrio50	0.15	0.32
Poliéster + F cabuya Tejido alternado orientación 0 y 45°, curado a 40°C y 16 horas	0.26	0.15

Se observa para todos los casos, que la adición de refuerzos a la matriz termoestable representó una mejora de sus propiedades mecánicas. Es así que el esfuerzo máximo a la tracción tuvo un incremento con respecto al poliéster en un rango del 3.8% (híbrido reforzado con fibra de coco y vidrio con una fracción volumétrica de 0.15) hasta el 151.3% (compuesto híbrido reforzado con fibra longitudinal de abacá y vidrio con una fracción volumétrica de 0.20). El esfuerzo máximo a la flexión presentó un aumento desde 26.3% (material reforzado con fibra de cabuya) hasta 111.4% (híbrido reforzado con fibra longitudinal de abacá y vidrio con una fracción volumétrica de 0.20).

El módulo elástico a tracción tuvo un aumento con respecto a la matriz en un rango de 37.5% (híbrido reforzado con fibra longitudinal de abacá y vidrio con una fracción volumétrica de 0.20) hasta 264.4% (material reforzado con fibra de cabuya). Por otra parte, el módulo elástico a flexión se incrementó en un

rango comprendido entre 105.4% (híbrido reforzado con fibra de coco y vidrio con una fracción volumétrica de 0.15) hasta 237.0% (compuesto reforzado con fibra de vidrio).

El material reforzado con fibra de vidrio y fracción volumétrica de 0.20 tuvo la mayor resistencia al impacto (0.51 J), con un incremento de 628.6% con respecto a la matriz poliéster. Un valor similar fue reportado para el compuesto híbrido reforzado con fibra continua de abacá y fibra de vidrio (0.49 J), en el cual el porcentaje de aumento fue de 600%. Por otra parte se observa que el material que presentó el menor incremento de esta propiedad (114.3%) fue el reforzado con fibra de cabuya (0.15 J).

IV. CONCLUSIONES

La incorporación de fibras de refuerzo a las matrices poliméricas permitió un incremento de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto. Este incremento dependió de las fracciones volumétricas empleadas, la configuración y tipo del refuerzo, entre otros.

Para la matriz poliéster se observó que a mayor fracción volumétrica de refuerzo los módulos elásticos a tracción presentaron un aumento.

Los ensayos de flexión e impacto realizados a los compuestos de matriz poliéster mostraron que a mayor cantidad de fibra de vidrio se produce un incremento en los módulos y en la resistencia al impacto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por el financiamiento para la realización de esta investigación en el marco de ejecución del proyecto PIC-08-493 "Desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones estructurales e industriales".

REFERENCIAS

- [1] B. Mitchell, "An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers", Wiley Interscience, New Jersey, 2004.
- [2] D. Newton, "Chemistry of new materials", Facts On File, New York, 2007.
- [3] H. Mahmood, "Mechanics of Fibrous Composites", Elsevier Science Publishers, New York, 1991.
- [4] P. Barghoorn, U. Stebani y M. Balsam, "Trends in Polymer Chemistry. Part 2: Applied Macromolecular Chemistry", WILEY-VCH, 1998.
- [5] D. Chung, "Composites Materials science and applications", Springer, Londres, 2010.
- [6] D. Hull, "Materiales compuestos", Editorial Reverte, Barcelona, 2003.
- [7] W. Smith, "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales", McGraw-Hill, México, 2006.
- [8] FAO, "El año internacional de las fibras naturales 2009; ¿Por qué naturales?", Recuperado de: http://www.fao.org/ec/Fibras/AIFN_hojas.pdf [citado el 1 de diciembre de 2009]
- [9] B. Mano, J. Araújo, N. Spinacé y M. de Paoi, "Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions", Journal of Composites Science and Technology, No.70, pp. 29-35, 2010.

- [10] A. K. Mohanty, M. Misra y L. Drzal, "Natural fibers, biopolymers, and bio-composites", Taylor y Francis, Michigan, 2005.
- [11] D. Leatham, L. Pareja, W. Salazar y C. Bocardo, "Economic Factors Affecting the Production of Abacá in Ecuador", 2000. Recuperado de: <http://www.sica.gov.ec/> [citado el 1 de marzo de 2010]
- [12] MALDONADO, L. "Situación Actual de la Producción y Comercialización del abacá en el Ecuador", Primer Encuentro Nacional de Productores y Artesanos de Fibras Naturales: Memorias técnicas, 2000. Recuperado de: <http://biblioteca.espe.edu.ec/> [citado el 1 de marzo de 2009]
- [13] M. Lewin, "Handbook of Fiber Chemistry", Taylor & Francis Group, 2007.
- [14] J. Gordon, "Handbook of textile fibres", Woodhead Publishing, 1964.
- [15] G. Pabón, "Etnobotánica de fibras naturales en el Ecuador. Primer Encuentro nacional de productores y artesanos", Memorias técnicas, Ibarra, 2000.
- [16] F. Neto y P. Pardini, "Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia", Blucher, Sao Paulo, 2006.