

A. Pozo^a, A. Fernández-López, A. Güemes

^aDepartamento de Materiales Compuestos, Center of Composite Materials and Smart Structure (CCMSS), Universidad Politécnica de Madrid, Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid, Spain, ar.pozo@aero.upm.es, www.aero.upm.es/departamentos/smart-composites

Diseño y Fabricación de una pala de aerogenerador mediante material compuesto biodegradable

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Biocompuesto

Fibras bambu

Termoplásticos

Pala aerogenerador

El desarrollo de una industria respetable con el medioambiente, tecnología sostenible y procesos optimizados con un menor impacto es una preocupación permanente en la sociedad actual; sin embargo, su desarrollo es todavía un reto difícil de conseguir.

Los materiales estructurales biodegradables pueden contribuir a reducir las emisiones de CO₂, la huella de carbón e incrementar el concepto de reciclado en aplicaciones estructurales. En términos de rendimientos, los materiales compuestos de fibras naturales pueden llegar a ser una alternativa viable para reducir el uso de los materiales compuesto de fibra de vidrio E-epoxi, materiales de madera reforzados y aleaciones de aluminio, debido principalmente a su buena relación entre las propiedades mecánicas, densidad y coste. Sin embargo, las aplicaciones ingenieriles estructurales son todavía muy limitadas principalmente debido a la falta de un proceso de fabricación robusto.

Para conseguir desarrollar un proceso de fabricación robusto, se ha desarrollado una innovadora metodología de extracción de la fibra basada en la morfología de dos especies de bambú, junto con la optimización de los parámetros relacionados con la fundición del termoplástico biodegradable seleccionado PLA. El objetivo final es desarrollar un material completamente biodegradable con buenas prestaciones mecánicas. Además, con el fin de definir las futuras aplicaciones, las propiedades mecánicas han sido ampliamente estudiada junto con el comportamiento en determinadas condiciones de envejecimiento.

Design and Manufacturing of a small wind turbine with biodegradable composite material

ABSTRACT

Keywords:

Biocomposite

Bambu fibres

Thermoplastics

Wind turbine blade

Abstract

The awareness for developing an eco-friendly industry based on green materials, sustainable technologies and optimum process with less environmental impact are a general societal consciousness, but it is still a considerable challenge to achieve.

The biodegradable structural materials can contribute to reduce the CO₂ emissions, the carbon footprint and increase the concept of recyclability for structural applications. In terms of performances, the natural fiber reinforced composite material could become in worthy alternative to E-Glass composite, wood reinforced materials and aluminum alloys because of their good ratio between mechanical properties, density and cost. However, the structural engineering applications are still very limited mainly because the lack of a robust manufacturing process. For that purpose, it has been developed an innovative mechanical extraction methodology based on the morphology of two species of bamboo, along with the optimization of the melting parameters to manufacture a fully biodegradable Bamboo-PLA composite.

Furthermore, in order to define the future applications, the mechanical properties have been analyzed under different thermal cycling conditions.

1 Introducción

En la última década ha incrementado el uso de las fibras naturales debido a sus altas prestaciones en términos de propiedades mecánicas específicas, abundante disponibilidad, recursos renovables, concepto de reciclado, CO₂ neutral, no toxicidad bajo inhalación, directamente extraídas de la naturaleza, no abrasivas para las máquinas de mecanizado, baja energía consumida y bajo coste [1] [2]. Además, las fibras naturales procesadas como material compuesto junto con un polímero termoestable o termoplástico pueden ser una alternativa respetable con el medioambiente del compuesto de vidrio estándar. A continuación, una tabla con las propiedades de las fibras naturales de mayor uso en la industria:

Tabla 1 Propiedades mecánicas de las fibras naturales

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia Tracción (MPa)	Módulo Young (GPa)	Ref.
Bambú	0.59-0.66	146-1200	12.0-16.27	[3] [4]
Sisal	1.35-1.45	394 - 453	15.2-20.1	[5]
Cáñamo	1.18	960	23	[6]
Lino	1.58	812-1445	30-160	[7]

Como se puede observar, las propiedades mecánicas presentan una enorme variación en sus valores. Las desviaciones pueden ser debidas principalmente por:

- Los defectos y heterogeneidades a lo largo de la fibra, dificulta la medida de la sección considerada como media para estimar la tensión [3].
- La gran variedad de especies bajo la misma denominación. Por ejemplo, en el caso del bambú existe cerca de 1250 especies denominadas bajo el mismo nombre
- Diferentes propiedades a nivel macroscópico y microscópico, en función de lo que se considere como fibra elemental [8]
- Relación de las propiedades mecánicas con el área de cultivo, condiciones de extracción y zonas de la fibra [6]
- Diferentes metodologías de extracción mecánica y química, con distintos resultados en función de los parámetros de extracción.
- Resultados experimentales realizados en condiciones no estándar.

Todas estas condiciones complican la selección del tipo de fibra y las condiciones necesarias para obtener las mejores propiedades mecánicas, por lo que para elegir un candidato óptimo es necesario realizar un amplio estudio de su morfología, definir un método de extracción, ensayos mecánicos de la fibra, compatibilidad con el proceso de fabricación, ensayos mecánicos del material compuesto y futuras aplicaciones.

Con respecto a las propiedades de los materiales compuestos biodegradables, a pesar de los prometedores resultados de

las propiedades de la fibra encontrados en la literatura, las propiedades finales de los materiales compuestos son inferiores a las esperadas. Por lo tanto, la mayoría de aplicaciones encontradas en la literatura son del tipo no estructural (muebles, suelos, artículos de deporte) [8]. La siguiente tabla resume los principales valores publicados por compañías o recientes investigaciones.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de los materiales compuesto bio

Material	X _T (MPa)	E ₁₁ (GPa)	X _{Flexión} (MPa)	Ref.
Lino 2x2 / PLA	110	14	123	Composites Evolution
Lino / PLA	106.94	-	-	[9]
Kenaf / PLA	60	6.4		[10]
Kenaf / PLA	223	23.5	254	[11]
Jute / PLA	100.5	-	-	[12]
Sisal / PLA	188.5	3.8	-	[13]
Bambú Mat / PLA	77.6	1.8	149.3	[14]

Cabe señalar, la existencia de valores superiores obtenidos con resinas no biodegradables. Dichos materiales no han sido considerados debido al elevado contenido en resinas no biodegradables cercano al 50%, por lo que no pueden ser considerados como una alternativa ecológica.

Por lo tanto, el principal objetivo del presente estudio es desarrollar un estudio completo de un material compuesto biodegradable para aplicaciones estructurales. Para dicho propósito, se ha realizado una selección del candidato más prometedor (bambú), tipo de especie, proceso de extracción, proceso de fabricación y estudio de las propiedades mecánicas bajo condiciones de envejecimiento y estándar.

2 Material

La fibra de bambú tiene un especial interés en las investigaciones e industria como material estructural sostenible, debido principalmente a su baja densidad, altas propiedades mecánicas y bajo coste. Distintas aplicaciones en sectores secundarios pueden ser encontradas como (edificios, suelos reforzados, partes de automóvil y muebles) [15].

Tabla 3 Materiales compuestos de fibra de bambú

Material	X _T (MPa)	E ₁₁ (GPa)	X _{Flexión} (MPa)	Compañía
Vinilos	68,5	7,8	50,8	
Laminados	129	10,9	-	Bamboo composites
Suelo	35	-	-	
Tablones	37,5	3	-	Bamboo industry



Tabla 4 Características Morfológicas de las especies de Moso y Guadua de bambú

Especie	Longitud internodal (mm)	Longitud Nodal (mm)	Espesor Pared (mm)	Diámetro caña (mm)	Espesor sección ext.(mm)	Área haz (mm ²)	Distancia entre haces (mm)
Moso	250	18	10	90	2	0.35	0.13
Guadua	330	60	21	120	3	0.24	0.11

Como se puede observar en la Tabla 3, las soluciones y diseños propuestos por las compañías a nivel industrial (Tablones, Suelo, Laminados o Vinilos de bambú) tienen bajas propiedades mecánicas, debido principalmente a la falta de optimización del proceso durante la extracción de la fibra.

Otro factor a tener en cuenta, es la gran cantidad de especies, por lo que en el presente estudio se ha seleccionado las dos especies más utilizadas en el sector de la construcción (Moso y Guadua).

2.1 Estudio Morfológico

El bambú es una planta perenne perteneciente a la familia de las gramíneas. Consta de dos zonas diferenciadas en propiedades llamadas zona nodal y zona internodal. La distancia entre cada zona nodal varía en función de la especie [17]. La principal característica es la variación del contenido en haces de fibras a lo largo de la pared de la caña, siendo mayor en la zona exterior de la misma. Por lo que en la zona externa de la caña se tiene las mayores propiedades mecánicas Figura 1.

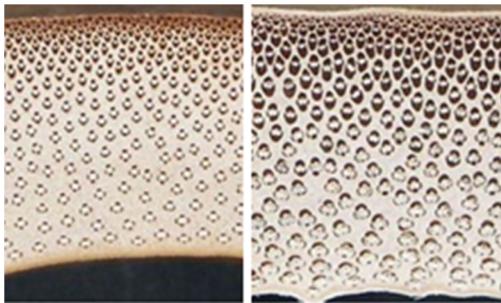


Figura 1. Sección transversal de la caña [Moso (izq.); Guadua(der.)]

En la Tabla 4 se muestra las principales características morfológicas de ambas especies. En cuanto mayor sea la distancia internodal, las influencia en las propiedades mecánicas del nudo serán inferiores. A su vez, en cuanto mayor sea el diámetro de la caña, mayor será la cantidad de fibras extraídas, en el presente estudio (tiras de bambú). Por lo tanto, basado en las condiciones morfológicas, la especie Guadua es considerada la mejor especie.

2.2 Proceso de extracción

Para obtener altas propiedades mecánicas en el material compuesto, es fundamental desarrolla un proceso de extracción óptimo. Actualmente, existen dos tipos de extracción desarrollados en la industria (mecánico y químico). Sin embargo la extracción de fibra natural en condiciones óptimas es todavía un reto a considerar. En el presente estudio se desarrolla una metodología de extracción del tipo mecánico basado en las características morfológicas.

En el método de extracción mecánica se ha propuesto extraer tiras de bambú de únicamente la zona externa de la caña,

puesto que es la zona de la que se obtienen las mejores propiedades mecánicas y a su vez las tiras son manejadas con facilidad durante el proceso de laminado. Las dimensiones finales de las tiras extraídas son (longitud 1500 mm, ancho 15 mm y espesor 1.5 mm), medidas obtenidas a través de ensayos mecánicos y fijando valores mínimos para poder fabricar geometrías curvas. Cabe señalar, que las los nodos también son tenidos en cuenta, provocando una caída en propiedades de hasta un 30%, por lo que se deberá de considerar durante el laminado y en las propiedades finales del material.

Con el fin de asegurar una estabilidad dimensional de las tiras, se ha realizado un proceso de corte en distintas secuencias en lugar de un proceso de lijado y pulido comúnmente realizado en la industria maderera.

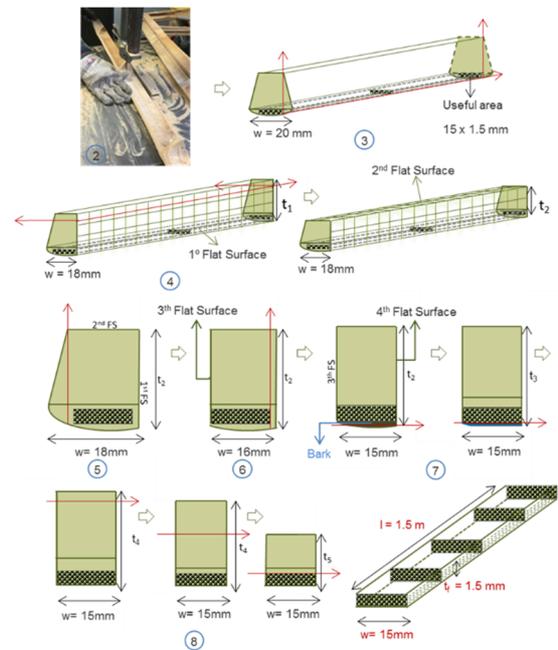


Figura 2 Proceso de extracción mecánica

Además, previo a desarrollar el proceso de extracción, se realiza un control de calidad basado en la edad (4 años) diámetro de la caña (110-120 m), mínima distancia internodal (300 mm), mínimo espesor de pared (20 mm) y zona de la caña de partida ("Baza"), con el fin de minimizar la influencia final en sus propiedades y disminuir las desviaciones estándar. Finalmente, es necesario definir unas condiciones de almacenamiento de la materia prima para evitar envejecimiento prematuro.

2.3 Propiedades mecánicas de la fibra

Se ha desarrollado ensayos mecánicos de las dos especies seleccionadas. Se he mecanizado listones con nudo y sin nudo para obtener la influencia del mismo. Se consideraron cinco probetas de cada tipo. Basado en la norma estándar



UNE-EN ISO 527-5 se obtuvo el Módulo de Young (E_{11}) y la resistencia a tracción (σ_{11}). Los ensayos fueron realizados en una máquina MTS 810 equipada con una célula de carga 100 kN, mordazas hidráulicas y un extensómetro de 25 mm.

La especie *Guadua* tiene las mayores propiedades mecánicas con una media de resistencia a tracción de 203 MPa (C.O.V. 16.2%) y un Módulo de Young 26 GPa (C.O.V. 6.4%). Las propiedades mecánicas disminuyen en torno al 30% debido a la presencia del nodo en las tiras en ambas especies [18]. Por lo tanto, la especie seleccionada para fabricar el material compuesto biodegradable es la *Guadua*

2.4 Matriz Biodegradable

El polímero seleccionado es el termoplástico PLA, debido a su carácter totalmente biodegradable, disponible a nivel industrial por la compañía Ingeo, disponible en distintos tipos de procesado y con un bajo coste. EL PLA (Ácido Poliláctico) pertenece a la familia de los poliésteres alifáticos con el ácido láctico como unidad fundamental. Se consideró el tipo film debido a su fácil manejo durante el proceso de laminado. Se realizó un estudio DSC, para determinar las propiedades de fundición. Cabe señalar que la principal limitación es su baja T_g 65°C, por lo que dicho valor limitará las futuras aplicaciones del material compuesto.

3 Proceso de fabricación

Se ha seleccionado un proceso de infusión de resina film para la fabricación de los paneles. Para obtener las mejores propiedades mecánicas, se han optimizado los parámetros que influyen en el proceso.

3.1 Laminado Manual

Un proceso de laminación manual ha sido seleccionado para posicionar las distintas capas formadas por tiras de bambú y film de resina PLA con la secuencia de laminado seleccionada. A lo largo del proceso de laminado, se debe evitar zonas de solapamiento entre las tiras y agujeros entre las mismas. Para reducir la influencia de los nodos de las tiras, se considera una distribución de los mismos a lo largo del panel. Los nodos son distribuidos en la mitad de cada capa y se lamina de forma que cada zona nodal tenga a lo largo del espesor una capa superior e inferior sin zona de nodos, con el fin de estabilizar las zonas nodales y por lo tanto reducir puntos débiles a lo largo del panel.

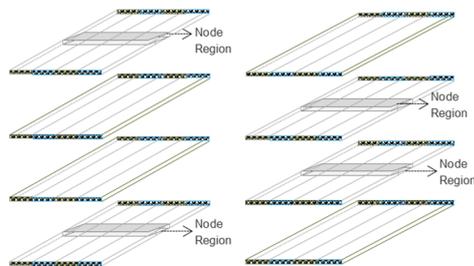


Figura 3 Distribución de la zona nodal

Además, cada capa ha sido laminada con un desfase de d (7.5 mm) entre tiras a lo largo del espesor entre capa superior e inferior. Finalmente, para minimizar la densidad del

compuesto e incrementar el contenido de fibra en el material, solo se han considerado 3 capas de film PLA por interfase.

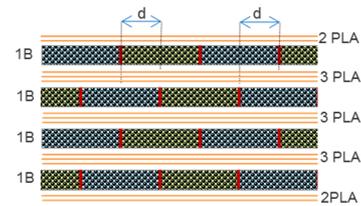


Figura 4 Distribución a lo largo del espesor

3.2 Proceso de fundición

Con el fin de reducir la porosidad, evitar zonas sin fundir o degradar la fibra, se ha realizado un estudio para determinar las condiciones óptimas de fundición. Se considera que el PLA tiene una temperatura y tiempo de fundición de (165°C, 8 min) y que la degradación térmica de las fibras naturales es cercana a los (200°C). El resultado del análisis:

- Las tiras de bambú se degrada incrementando la temperatura y tiempo superior 185°C, 20 min.
- Existencia de zonas sin fundir en el caso de temperaturas o tiempo inferior 165 °C, 8 min.

Por lo tanto, el rango de temperaturas y tiempo debe estar entre 180°C-185°C por al menos 20 min, valores acordes a otros estudios realizados [9]. A continuación, se presenta el ciclo seleccionado para el proceso de fabricación.

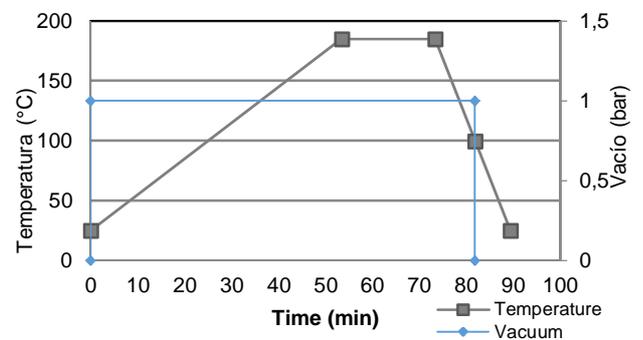


Figura 5 Ciclo de fundición

El proceso de fundición se desarrolla junto con una bolsa de vacío estándar para aplicar una presión uniforme. Finalmente, se determina el contenido en fibra y resinas del material compuesto de bambú / PLA, a través del software Image J.

- Contenido en fibra: 63%
- Contenido en lignina(matriz del bambú original): 33,5%
- Contenido de resina PLA: 3,5 %

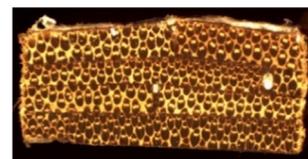


Figura 6 Sección transversal del material compuesto bambú/PLA



4 Demostrador fabricado

Con el fin de demostrar la capacidad de fabricación de piezas de geometría curva, se ha fabricado un demostrador de dimensión 350 x 150 mm con curvatura.



Figura 7 Demostrador de geometría curva

5 Resultados experimentales

Para realizar un estudio completo de las propiedades mecánicas y determinar las desviaciones estándar, se considera 20 probetas para cada ensayo mecánico estandarizado (tracción, compresión, cortadura en el plano y flexión en 4 puntos). Los ensayos fueron realizados en una máquina MTS 810 equipada con una célula de carga 100 kN, mordazas hidráulicas y un extensómetro de 25 mm.

Además, se considera una condición de envejecimiento para poder definir sus futuras aplicaciones. El propósito de la misma, es demostrar la capacidad del material a tolerar temperatura y humedad, condiciones que será expuesto durante su vida útil.

- Condición SC: Temperatura fija de 50°C y humedad relativa de 95% durante 170 horas.

A continuación, se muestra los resultados experimentales de los ensayos mecánicos junto con una comparativa de los mismo con los valores específicos obtenido del software Esacomp del material vidrio del tipo E/Epoxi. Las propiedades específicas del material compuesto biodegradable bambú/PLA ha sido calculada de forma experimental 0.91 [g/cm³].

5.1 Ensayos a Tracción Longitudinal

Acorde a la norma estándar UNE_EN ISO 527-5. La secuencia de laminado es [0°]₄ y dimensiones de la probeta 250x15x6 mm.

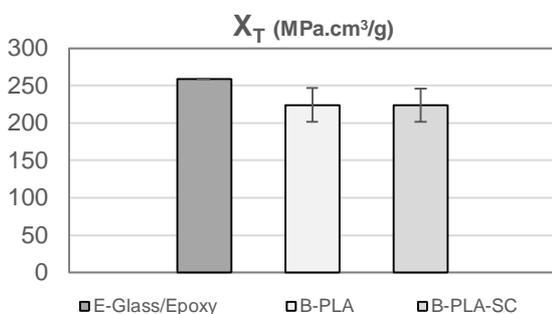


Figura 8 Resistencia específica a tracción

Las propiedades a tracción del material compuesto biodegradables son comparables al material referencia, e incluso en el caso del módulo de Young el doble.

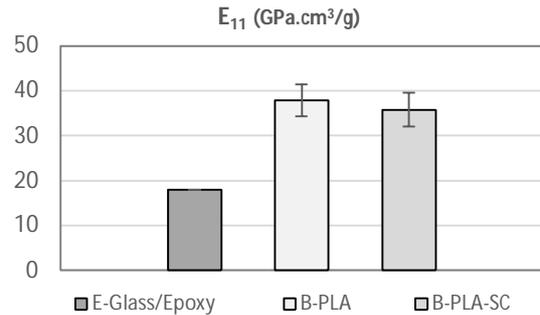


Figura 9 Módulo específico de Young

El fallo a tracción es debido a una rotura de las fibras junto con una grieta longitudinal de la resina PLA.

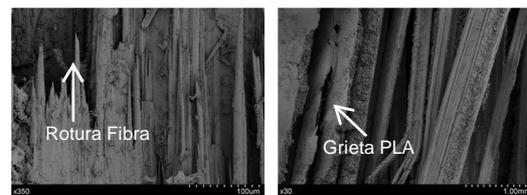


Figura 10 Fallo a tracción longitudinal

5.1 Ensayos a Compresión Longitudinal

Acorde a la norma estándar ASTM-D695. La secuencia de laminado es [0°]₄ y dimensiones de la probeta 80x12.5x6 mm.

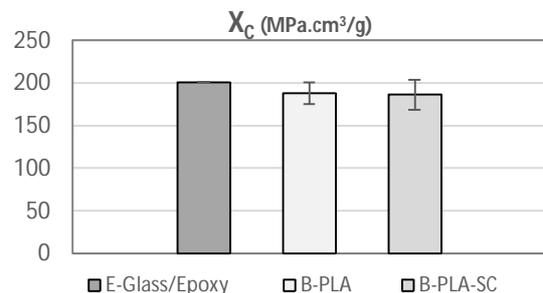


Figura 11 Resistencia específica a compresión

Similar al caso anterior, la propiedad específica es comparable a la referencia. Además la relación entre propiedad a tracción y compresión es similar a los materiales estándar 84 %. La desviación estándar también se encuentra alineada con los materiales tradicionales, inferior al 10%.

El modo de fallo aparece en la interfase entre la lignina y el PLA. Las tiras de bambú rompen a 45° debido a un estado inicial de pandeo. Se trata de un fallo estándar en materiales compuestos.

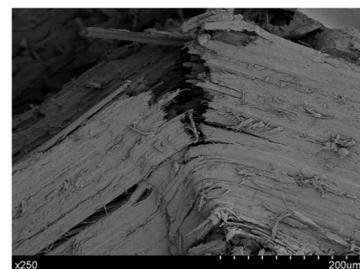


Figura 12 Fallo a compresión longitudinal



5.2 Ensayos a Cortadura en el plano

Acorde a la norma estándar UNE-EN ISO 14129. La secuencia de laminado es $[+45^\circ, -45^\circ]_s$ y dimensiones de la probeta 250x25x6 mm

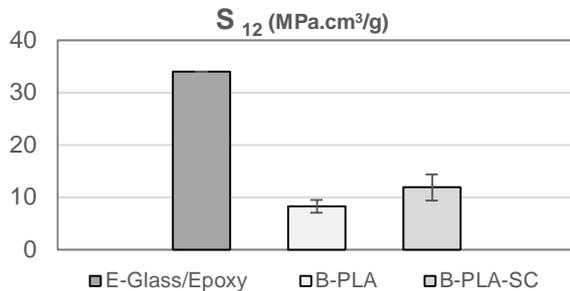


Figura 13 Resistencia específica a cortadura en el plano

El valor de la propiedad de la propiedad no es comparable con su referencia. El valor tan bajo puede ser explicado debido a la baja adherencia entre fibra y matriz, la presencia de puntos débiles como zonas ricas en resina y zonas sin resina entre las tiras, las cuales pueden promover un fallo prematuro.

La baja adherencia entre el bambú y el PLA puede ser mejorada a través de tratamiento químico o mecánico. Por lo que será una línea de investigación futura. Sin embargo debe señalarse, que valores tan altos como el del material de referencia serán difícil de conseguir, por lo que otro tipo de resina puede ser considerada en futuras investigaciones.

El tipo de fallo se produce debido al crecimiento de grietas a lo largo de las interfases fibra-lignina en la tira de bambú (Figura 14 izq.) y matriz de PLA - lignina entre capas (Figura 14 der.).

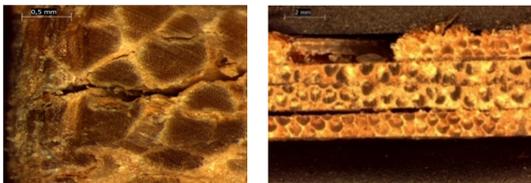


Figura 14 Fallo a cortadura en el plano

5.1 Ensayos a Flexión en 4 puntos

Acorde a la norma estándar UNE-EN ISO 14125. La secuencia de laminado es $[0^\circ]_3$ y dimensiones de la probeta 120x25x4.5 mm.mm.

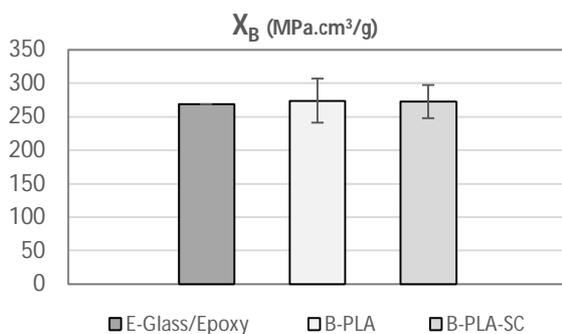


Figura 15 Resistencia específica a flexión 4 puntos

Al igual que en el caso de tracción y compresión, la propiedad es similar al valor de referencia. El modo de fallo aparece en la interfase entre capas en los bordes de la probeta. Cabe destacar que este modo de fallo es considerado como no válido en la norma estándar.

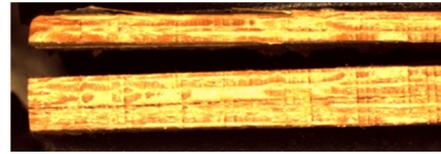


Figura 16 Fallo a flexión en 4 puntos

Respecto al comportamiento del material bajo las condiciones de envejecimiento, se observa que las propiedades de tracción, compresión y flexión son similares al valor sin ciclo de envejecimiento. Por lo tanto el ciclo de envejecimiento no tiene una significativa influencia en las mismas.

En el caso de la resistencia a cortadura en el plano el valor se incrementa en un 43% comparadas con el caso de sin ciclo de envejecimiento. Con el fin de entender dicho comportamiento y definir las aplicaciones admisibles, será necesario un estudio más profundo de las propiedades bajo distintas condiciones de envejecimiento, teniendo en cuenta que el valor de la T_g del PLA es 65° .

Finalmente, cabe señalar que a pesar de la influencia negativa que tiene la presencia del nodo en las tiras aisladas de bambú, las optimizaciones introducidas en el proceso de fabricación compensan la presencia de la zona nodal, aseguran bajas desviaciones estándar y altas propiedades específicas.

Estos resultados demuestran el potencial del material a ser una alternativa real y ecológica al material compuesto de fibra de vidrio tipo E / epoxi.

6 Conclusiones

El principal objetivo del estudio fue desarrollar un material completamente biodegradable para aplicaciones estructurales. El objetivo fue conseguido a través de un estudio bibliográfico y pruebas mecánicas de una selección de las fibras y resinas presentes en la industria, el desarrollo de un proceso de extracción y fabricación, los cuales han sido optimizados en función de los resultados experimentales que se han ido obteniendo.

Los resultados experimentales de los ensayos realizados, muestran unos valores de las propiedades mejores a las consideradas inicialmente debido a la presencia de la zona nodal. Por lo que queda de manifiesto, que los parámetros involucrados en el proceso de fabricación tienen una influencia notoria en los resultado final obtenidos.

Cabe destacar la baja densidad del material $0,91 \text{ gr/cm}^3$, junto a sus altas propiedades mecánicas (como el módulo de Young $38 \text{ [GPa. cm}^3/\text{g}]$), le confieren al material compuesto completamente biodegradable bambú /PLA ser una alternativa ecológica real a su materiales de referencia compuesto E vidrio/epoxi, aluminio o madera reforzada.

Sin embargo, la resistencia a cortadura en el plano es menor que su valor de referencia. Este valor se encuentra



principalmente relacionado con la adherencia fibra matriz, por lo que puede ser mejorado aplicando tratamientos químicos o mecánicos a los listones del proceso de extracción. Cabe considerar que otros tipos de resino no biodegradables como el epoxi o resina fenólica puede ser utilizadas como matriz, debido a que el contenido de la matriz entre las capas de bambú es mínimo (3.5% en el caso del PLA), por lo que el material compuesto final seguiría teniendo un alto grado de biodegradabilidad.

Otro importante análisis es el comportamiento bajo distintas condiciones de envejecimiento. La condición propuesta resulta no ser la más favorable para determinar las máximas condiciones admisibles, puesto que el material apenas se ve influenciado por la misma. Por lo tanto, una condición de envejecimiento con mayor tiempo y temperatura debe ser considerada en el futuro, para determinar los admisibles del material

Referencias

- [1] D.U. Shah, P.J. Schubel, M.J. Clifford, Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study, *Compos. Part B Eng.* 52 (2013) 172–181. doi:10.1016/j.compositesb.2013.04.027.
- [2] N. Abilash, M. Sivapragash, Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* 28 (2013) 1–11. doi:10.1016/j.jksues.2013.09.004.
- [3] F. Wang, J. Shao, L.M. Keer, L. Li, J. Zhang, The effect of elementary fibre variability on bamboo fibre strength, *Mater. Des.* 75 (2015) 136–142. doi:10.1016/j.matdes.2015.03.019.
- [4] F. Wang, X. Li, J. Zhang, L. Li, L.M. Keer, Micromechanical modelling of the progressive failure in unidirectional composites reinforced with bamboo fibres, *Mech. Mater.* 94 (2016) 180–192. doi:10.1016/j.mechmat.2015.12.006.
- [5] X. Zhao, R.K.Y. Li, S.-L. Bai, Mechanical properties of sisal fiber reinforced high density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 65 (2014) 169–174. doi:10.1016/j.compositesa.2014.06.017.
- [6] A. Thygesen, Properties of hemp fibre polymer composites, 2006. doi:(Risø-PhD; No. 11(EN)).
- [7] M. Aslan, The effect of processing on defects and tensile strength of single flax fibres, *Proceedings.* (2010). <http://www.forskningdatabasen.dk/en/catalog/152995149> (accessed March 10, 2017).
- [8] K.G. Satyanarayana, G.G.C. Arizaga, F. Wypych, Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview, *Prog. Polym. Sci.* 34 (2009) 982–1021. doi:10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002.
- [9] A. Rubio-López, A. Olmedo, A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste, Manufacture of compression moulded PLA based biocomposites: A parametric study, *Compos. Struct.* 131 (2015) 995–1000. doi:10.1016/j.compstruct.2015.06.066.
- Por lo tanto, el potencial del material en aplicaciones estructurales es considerable. Podría cumplir los requisitos para sectores como el de la energía eólica (palas de aerogenerador), automoción (carrocería), construcción (edificios), en los cuales el coste del material es un factor a tener en cuenta.

7 Agradecimientos

El presente proyecto se ha desarrollado financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA) junto con la colaboración de la compañía Abengoa.

- [10] T. Nishino, K. Hirao, M. Kotera, K. Nakamae, H. Inagaki, Kenaf reinforced biodegradable composite, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 1281–1286. doi:10.1016/S0266-3538(03)00099-X.
- [11] S. Ochi, Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites, *Mech. Mater.* 40 (2008) 446–452. doi:10.1016/j.mechmat.2007.10.006.
- [12] D. Plackett, T.L. Andersen, W.B. Pedersen, L. Nielsen, Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibres, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 1287–1296. doi:10.1016/S0266-3538(03)00100-3.
- [13] J.T. Kim, A.N. Netravali, Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 1245–1252. doi:10.1016/j.compositesa.2010.05.007.
- [14] A. Porras, A. Marañon, Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric, *Compos. Part B Eng.* 43 (2012) 2782–2788. doi:10.1016/j.compositesb.2012.04.039.
- [15] S.A. Bahari, A. Krause, Utilizing Malaysian bamboo for use in thermoplastic composites, *J. Clean. Prod.* 110 (2016) 16–24. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.052.
- [16] C.S. Verma, N.K. Sharma, V.M. Chariar, S. Maheshwari, M.K. Hada, Comparative study of mechanical properties of bamboo laminae and their laminates with woods and wood based composites, *Compos. Part B Eng.* 60 (2014) 523–530. doi:10.1016/j.compositesb.2013.12.061.
- [17] P. Zakikhani, R. Zahari, M.T.H. Sultan, D.L. Majid, Bamboo Fibre Extraction and Its Reinforced Polymer Composite Material, *Int. J. Chem. Biomol. Metall. Mater. Sci. Eng.* 8 (2014) 271–274.
- [18] A.F.A.G. A.Pozo, Determinación de las propiedades mecánicas del biocomposite fibra de Bambú / PLA, *MatComp* 2015. (2015).

