

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNIONES DE MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ TERMOPLÁSTICO PARA BICICLETAS DE BAMBOO

Karen J. Quintana

Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, kiquintanac@gmail.com

Miguel A. Hidalgo

Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, mahidalgo@uao.edu.co

Mario F. Muñoz

Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, mariof85@hotmail.com

RESUMEN

El presente artículo muestra una alternativa para fabricar uniones diseñadas con material compuesto de matriz termoplástica. En el mercado y artesanalmente se viene fabricando con resinas termofijas reforzadas con fibras, para bicicletas de alto desempeño se fabrican con fibras de carbono, también se utilizan las fibras naturales como el cáñamo, para bicicletas de turismo. El interés de fabricarlas con plástico reforzado, se basa principalmente por los requerimientos de manufactura que se tiene actualmente con la matriz termofija, igualmente el de reducir costos y tiempos de manufactura. Se utilizó la metodología del QFD, siendo posible evidenciar, que la mayor ponderación en requerimientos para esta aplicación en particular, se encuentra en el proceso de manufactura de las uniones, tiempo de manufactura, y el costo del material a utilizar, para lo cual se priorizaron estas restricciones para seleccionar un material que facilite obtener las uniones por el proceso de inyección. Para seleccionar el material se utilizó la metodología de Ashby, como metodología sistemática, que facilitó maximizar el coeficiente de eficiencia del material termoplástico. Éste fue calculado para la condición de esfuerzo de las uniones como $M=\sigma/\rho$, teniendo en cuenta que las uniones trabajan bajo esfuerzos combinados. De acuerdo a esta metodología, fue posible seleccionar un polímero reforzado, con una densidad promedio de 1.14 g/cm^3 , y una resistencia máxima entre 50 70 MPa, encontrando en el mercado que el Polypropylene Homopolymer Glass Fiber Reinforcement 30%, cumplía con estas propiedades. Éste fue procesado para obtener experimentalmente las propiedades mecánicas, las cuales se utilizaron para validar el material, de acuerdo al desempeño de las uniones, utilizando un modelo computacional resuelto por el método de elementos finitos (FEA), con el cual fue posible calcular numéricamente los estados de esfuerzos y deformaciones de las uniones fabricadas con el PP reforzado, a condiciones de carga.

Palabras clave: Bamboo, bicicleta, material compuesto termoplástico.

ABSTRACT

This article shows an alternative to make connections designed with thermoplastic matrix composite material. In the market and handcrafted are manufactured with fiber reinforced thermoset resins; for high performance bicycle are made of carbon fibers; natural fibers such as hemp are also used for touring bikes. The interest for manufacturing them with reinforced plastic is based mainly on the manufacturing requirements which currently have the thermosetting matrix, also to reduce manufacturing costs and time. QFD methodology was used, being able to show that the greatest weighting requirements for this particular application is in the unions manufacturing process, manufacturing time and material cost, for which these restrictions were prioritized to use a material which facilitates obtaining bonds for the injection process. To select the material, the methodology of Ashby was used as a systematic approach, which helped maximize the efficiency coefficient of the thermoplastic material. It was calculated for the stress condition of the joints as $M=\sigma/\rho$, taking into account that unions work under

combined efforts. According to this methodology, it was possible to select a reinforced polymer with an average density of 1.14 g/cm^3 , and a maximum resistance between 50 70 MPa, on the market finding that the Glass Fiber Polypropylene Homopolymer Reinforcement 30% satisfied these properties. It was processed to obtain experimentally the mechanical properties, which were used to validate the material, according to the joints performance, using a computational model solved by the finite element method (FEA), with which it was possible to calculate numerically the joints stress and strain states made of PP reinforced , under load conditions.

Keywords: Bamboo, bicycle, thermoplastic composite material.

1. INTRODUCCIÓN

El bambú es un importante recurso forestal, tiene un ciclo de crecimiento corto, altamente reciclable, y es un material natural que protege el medio ambiente, su utilización es milenaria. Para el caso particular de la bicicleta se conocen dos prototipos de bicicletas de tipo orgánico y ecológico, y que hoy en día están siendo comercializadas y de mucha utilidad. El primer prototipo es fabricado por aficionados y el otro por ingenieros, ambos diseños novedosos y sostenibles.

El primer prototipo de diseño es de África, su continente natal, ya ha ganado varios premios por la innovación y la ecología y también la sustentabilidad de sus recursos, es una buena idea para el transporte de pasajeros “livianos” llámese niños y adultos con poco peso, este gran invento que es la bicicleta de bambú.

El otro prototipo de diseño, fue fabricado por un ingeniero, y consiste en una bicicleta construida en base a cáñamo, basada en sus fibras, y después pegada con resinas de epoxi, y espuma de polietileno, 60% de cáñamos, 15% de bambú, y el resto de aluminio y carbono.

El inventor de todo esto es un alemán de apellido Meyer que pensó en todos los inconvenientes de una bicicleta normal, como son principalmente el peso y la construcción de ellas con materiales contaminantes y le dio estas características nuevas a los materiales de su construcción y dando con ello un nuevo paso en lo que se llama actualmente bicicletas orgánicas, y que literalmente son bicicletas construidas para esta forma de recursos, y que son realmente un beneficio en costos tanto de materiales en el uso nuevo que se les da con el empleo de materiales no contaminantes o reciclados [1].

En el presente trabajo se describe una alternativa para facilitar obtener uniones más económicas, fabricadas con materiales compuestos de matriz termoplástica, las cuales son susceptibles de manufacturarse en serie, y servir como kits, para que cualquier persona pueda fabricar una bicicleta de bamboo.



Figura 1. Prototipos de bicicletas de bamboo, aficionado y de ingeniería.

En la figura 1 se pueden observar los dos tipos de bicicletas de bamboo.



Figura 2. Uniones en fibra de carbono de bicicletas comerciales de alto desempeño.

La resistencia y propiedades del bamboo son conocidas y facilitan el diseño de marcos de bicicletas, pero se debe garantizar uniones lo suficientemente rígidas para garantizar la funcionalidad, estas uniones se vienen fabricando con matrices termofijas de epoxicas, y fibras como el cáñamo o sintéticas como el carbono y fibra de vidrio [2].

En la figura 2 se pueden observar uniones en fibra de carbono de bicicletas comerciales.

2. MÉTODOS DE DISEÑO

En el diseño de productos, el establecer los parámetros de diseño más importantes, que permitirán hacer que la aplicación final satisfaga completamente las especificaciones funcionales y geométricas, y las necesidades del cliente, constituye una de las acciones más importantes, por tanto esta determinación debe realizarse con la ayuda de herramientas de diseño que permitan categorizar y evaluar cada uno de los parámetros relevantes en cada aplicación específica, en este caso las uniones de las bambucicletas.

Para establecer estos parámetros de diseño se implementó el análisis QFD (despliegue de la función de calidad), en el cual a partir de 10 necesidades del cliente se obtuvieron 9 parámetros de diseño, los cuales se evaluaron, se ponderaron y se obtuvieron las relaciones necesarias para determinar la viabilidad de reemplazar la fibra de carbono y la resina epoxica, material utilizado para la fabricación de las uniones de las bicicletas de bambú, por un compuesto de matriz termoplástica, susceptible de ser procesado por inyección o transferencia.

Es importante resaltar que en este proyecto el bambú no será objeto de estudio ya que se considera que este material reemplaza satisfactoriamente al aluminio estructural comúnmente utilizado para fabricar los marcos de las bicicletas, por tanto se pondrá énfasis en el remplazo del material empleado para la fabricación de las uniones.

En la figura 3 se presentan las necesidades del cliente y su respectiva ponderación, para una bicicleta tradicional.

Asociación Latinoamericana de QFD		Matriz de relaciones: Bambucicletas con uniones en GFRCP		Calificación ponderada actual
				79,6%
Necesidad Superior	No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado	
Durabilidad	1	Resista cargas considerables	10,3%	
	2	Resistente caídas	10,3%	
	3	Resistente al medio ambiente	7,7%	
	4	Larga vida útil	7,7%	
Costo	5	Económico	12,8%	
	6	Comodidad	10,3%	
Ergonomía	7	Liviana	10,3%	
	8	Piezas de fácil obtención	10,3%	
Mantenimiento	9	Fácil ensamble	12,8%	
	10	Apariencia agradable	7,9%	
			100,0%	

Figura 3. Matriz de relaciones de requerimientos de la bambucicleta.

Los parámetros de diseño obtenidos a partir de estas necesidades y las correlaciones entre estos dos aspectos se muestran en la figura 4.

	Parámetros de Diseño								
	1 9,4%	2 9,4%	3 9,4%	4 8,7%	5 8,7%	6 7,3%	7 17,9%	8 12,9%	9 16,4%
Necesidad del Cliente	Esfuerzo del material	Deformación	Resistencia al impacto	Oxidación	Corrosión	Masa total	Costo de producción	Tiempo de fabricación	Proceso de producción
Resista cargas considerables	9	9	3	0	0	3	3	0	1
Resistente caídas	3	1	9	0	0	0	3	0	1
Resistente al medio ambiente	0	0	0	9	9	0	3	0	0
Larga vida útil	9	9	9	9	9	0	3	0	3
Económico	3	3	3	3	3	1	9	9	9
Comodidad	0	1	0	0	0		3	0	9
liviana	3	3	3	0	0	9	3	3	0
Piezas de fácil obtención	0	1	0	0	0	3	9	9	9
Fácil ensamble	0	0	0	0	0	3	9	9	9
Apariencia agradable	0	0	0	9	9	0	1	1	0

Figura 4. Matriz de calidad para la bambucicleta.

A partir de estas correlaciones y el peso ponderado de cada una de las necesidades del cliente se puede determinar cuales son los parámetros de diseño más importantes a considerar en el nuevo material de tal forma que permitan finalmente optimizar el la bambucicleta.

En la figura 5 se evidencia que los parámetros más influyentes en el diseño son el costo de producción, el proceso de producción y el tiempo de producción, por tanto el material diseñado debe priorizar estos aspectos, permitiendo la optimización del diseño.

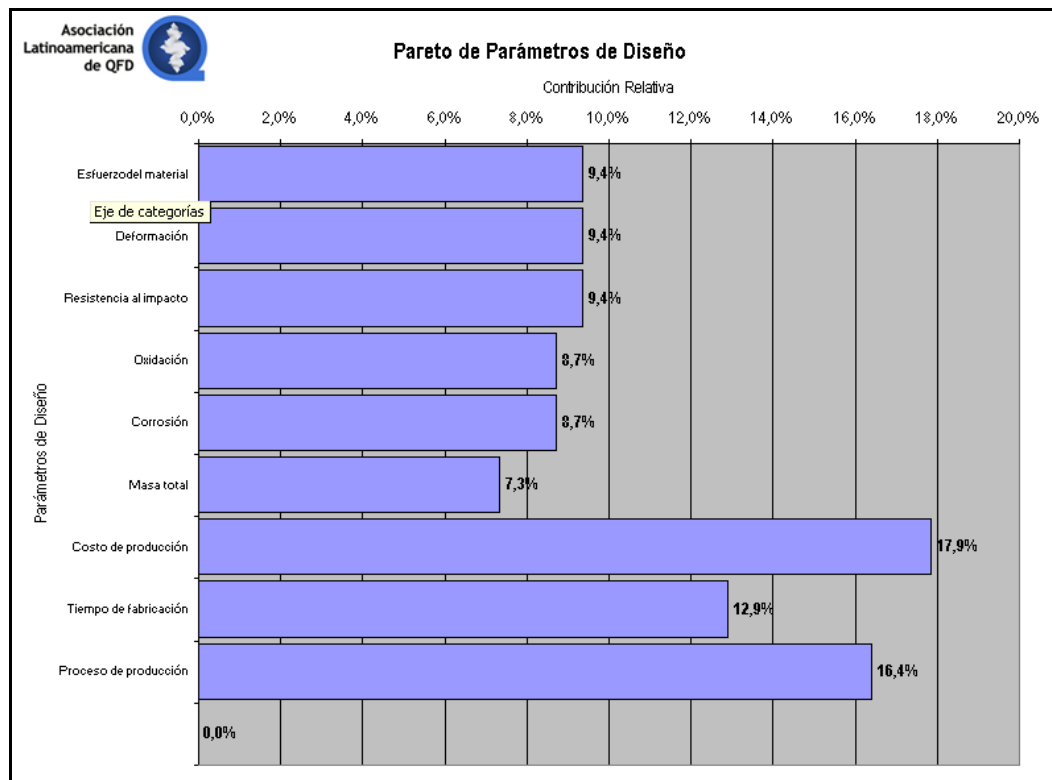


Figura 5. Peso de los parámetros de diseño.

Es importante destacar que los parámetros referentes a las propiedades mecánicas del material tienen un valor considerable, por tanto son factores que no se deben minorizar.

La figura 5 muestra claramente que el factor de diseño en el que más se ganaría optimización en el diseño es el costo de producción, conforme a lo mostrado en la figura 4 los tres parámetros enunciados anteriormente son los más relevantes en este diseño. Es necesario enfatizar que las propiedades mecánicas presentadas por el material actual con el que se fabrican las uniones son adecuadas por tanto el diseño del nuevo material debe garantizar la resistencia y rigidez y seguridad, correspondiente para a una bicicleta de turismo, objeto de estudio en el presente trabajo.

Como se pudo establecer anteriormente, los requerimientos más importantes, están relacionados con el tiempo de manufactura costo y materiales, para resolver este problema, se propuso trabajar bajo la metodología de Ashby, utilizando la función de desempeño, la cual facilita seleccionar el material más adecuado para las uniones de la bicicleta, bajo un índice de desempeño, principalmente basado en el coeficiente de eficiencia del material.

3. EL MODELO DE DESEMPEÑO

Entonces, en síntesis, las cargas que deben soportar las uniones hacen parte de los Requerimientos Funcionales (F) del elemento, la forma definida y delimitada son los Requerimientos Geométricos (G) del elemento y que el material específico del cual está fabricado el elemento tiene unas determinadas Características de Material (M). Estos tres ítems se resumen en la ecuación que define el desempeño del las uniones a analizar y a optimizar [3].

De cuerdo a la problemática de las uniones de la bicicleta, se debe optimizar la función de desempeño, la cual se consigue al optimizar el coeficiente de eficiencia del material para las uniones de la bicicleta, basados en

requerimientos de resistencia y densidad, los cuales deben estar respectivamente entre, 0,9 y 1.3 g/cm³ (por peso máximo de la bicicleta de turismo entre 18 kg y 23 kg) y entre 40-70 MPa de esfuerzo de fluencia para las uniones, estos datos fueron validados computacionalmente, y se ampliara más adelante, además el material debe ser termoplástico y permitir ser procesado por inyección o moldeo por transferencia. Los anteriores datos se obtuvieron después de realizar un estudio de la estática y cinemática de la bicicleta, utilizando simulaciones por computador.

En la figura 6 y 7 se pueden observar los modelos computacionales en 3D, los cuales servirán posteriormente para obtener la mallas, para resolver los problemas de elementos finitos, de la figura 6, podemos observar que los elementos de unión a,b,c y d, trabajan bajo condiciones de esfuerzos combinados, para lo cual es necesario plantear las siguientes ecuaciones que facilitan obtener la función de desempeño separable:

Criterio de falla de esfuerzos combinados de Von Mises.

$$\sigma_{x,z} = \frac{\sigma_N + \sigma_T}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_N - \sigma_T}{2}\right)^2 + \sigma_{NT}^2} = \frac{\sigma_T}{F.S}$$

Donde:

$$\sigma_N = \frac{Mc}{I} \quad \sigma_T = \frac{F}{A} \quad \sigma_{NT} = \frac{\tau r}{J}$$

Obteniendo:

$$\sigma_{x,z} = \frac{\frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{Mc}{I} - \frac{F}{A}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau r}{J}\right)^2} = \frac{\sigma_T}{F.S}$$

Teniendo en cuenta las condiciones geométricas y momentos se obtiene finalmente:

$$\frac{\sigma_T}{F.S} = \frac{\frac{\frac{Mr}{A} + \frac{F}{A}}{2}}{\frac{A}{2}} \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{Mr}{A} - \frac{F}{A}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{Tr}{A}}{2}\right)^2}$$

Relacionando el área y densidad finalmente se obtiene el índice de desempeño, basado en las restricciones del material:

$$A = \frac{F.S}{2\sigma_T} \left(\frac{2M}{r} + F \right) \pm \frac{1}{A} \sqrt{\left(\frac{\frac{2M}{r} - F}{2} \right)^2 + \left(\frac{2T}{r} \right)^2}$$

$$m = \left(\frac{F.S}{2\sigma_T} \left(\frac{2M}{r} + F \right) \pm \frac{1}{A} \sqrt{\left(\frac{\frac{2M}{r} - F}{2} \right)^2 + \left(\frac{2T}{r} \right)^2} \right) \rho$$

De acuerdo a las anteriores ecuaciones, el requerimiento funcional de rigidez y las constantes que se pueden asociar con cualquier función, y los parámetros geométricos, como longitud y formas dejan observar que el coeficiente de eficiencia del material viene dado por:

$$M = \frac{\sigma_f}{\rho}$$

En la Figura 6 se muestra un grafico de Ashby de esfuerzo de fluencia por densidad del material. Los materiales por encima de la línea de selección, de acuerdo al criterio calculado, tienen un alto valor de M, pero un alto costo y diferentes procesos de manufactura, por lo cual impide seleccionar compuestos de matriz termoestable, los criterios de costos y manufactura, para este tipo de productos son decisivos, debido a que es deseable producir piezas utilizando procesos de producción en serie, principalmente por moldeo por inyección de un polímero.

La franja de selección de materiales de acuerdo al desempeño M, muestra que los Materiales más económicos son los polímeros como los polipropilenos y Nylos, además cumplen con los requerimientos de resistencia (50-70 MPa), densidad (0,9-1,2 gr/cm³), rigidez, y manufactura, con ventajas principalmente en procesamiento en serie por inyección, a diferencia de los termofijos reforzados con fibras.

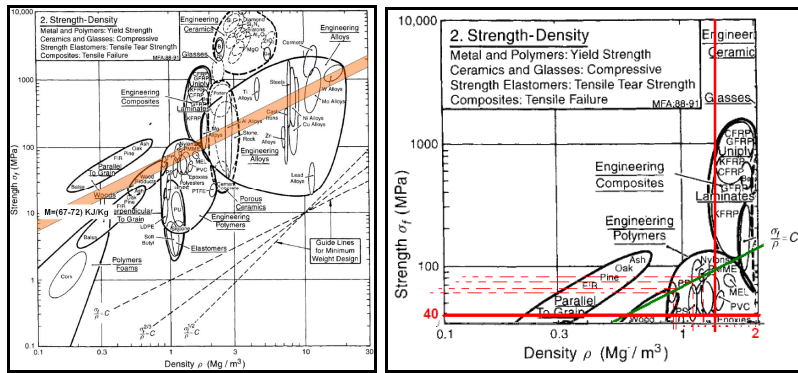


Figura 6. Grafica de Ashby, utilizada para calcular los índices de desempeño M, presentados en la tabla 1.

En la tabla 1 se puede observar los materiales candidatos, teniendo en cuenta las restricciones presentadas, y se hace un comentario a cada material.

En la tabla 2, es posible observar los valores que se obtuvieron de los índices M, los cuales facilitan el trabajo de selección.

Tabla 1. Materiales candidatos para fabricar las uniones de la bamboocicleta.

Material	$M = \frac{\sigma_f}{\rho}$	Comentarios
PP	67-72	Aceptable, Moldeable y económicos.
Nylons	62-68	Aceptable,. Seria otra opción, incluso ideal, por su desempeño mecánico.
PMME	55-57	Plexiglas, costoso, acrílicos, costosos y dificultad para procesar.

Resulta evidente que los PP son los más adecuados. Para el presente trabajo se tubo la oportunidad de obtener una muestra de un PP reforzado (Polypropylene Homopolymer-Glass-Fiber-Reif.30%), distribuido por PROPILCO (www.propilco.com), esta muestra fue caracterizada, utilizando la respectiva norma técnica ASTM, los valores obtenidos son similares a los reportados por los distribuidores y se utilizaron para realizar la validación computacional, se presentan en la tabla 2, bajo el método de elementos finitos, el cual dejo observar el desempeño final del material en las uniones, todos los valores serán reportados más adelante.

4. MODELADO COMPUTACIONAL

En las figuras 7 y 8 se pueden observar un modelo computacional de la propuesta de bicicleta, la cual se utilizo para realizar las respectivas simulaciones, de condiciones cricas de trabajo de la bicicleta, incluyendo una situación de caída súbita de la bicicleta, la cual se puede observar en la grafica 9 [4].



Figura 7. Modelo 3D, en el cual se pueden observar las uniones a,b,c y d, objeto de estudio de este trabajo.

Utilizando los modelos computacionales y las condiciones típicas de desempeño de las bicicletas, se realizaron las validaciones de los componentes, las cuales se pueden observar en las siguientes figuras.

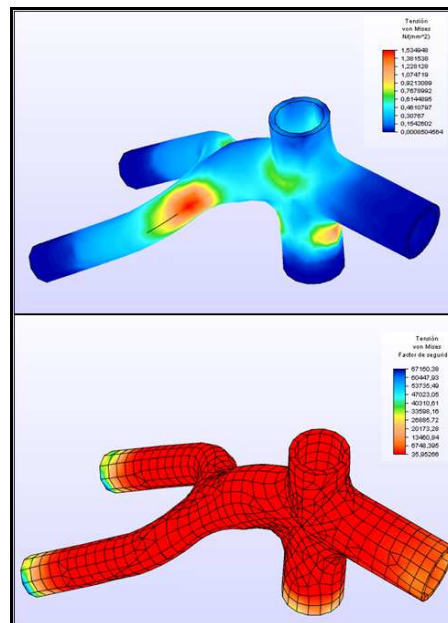


Figura 10. Desempeño de la unión del asiento.

Las figuras muestran, que para el caso de la unión del asiento, la máxima deflexión encontrada fue de 0,35 mm, presentada en la zona de mayor esfuerzo, y el factor de seguridad a estas condiciones es de 35, el cual, en principio se considerado subdimensionado, sin embargo, siendo más rigurosos en la evaluación, es posible encontrar que a condiciones críticas de trato del aparato, como la reportada en la caída, la pieza, esta fallaría, esto se puede observar en la figura 11, la cual muestra la caída del factor de seguridad y los valores de esfuerzo que superan los límites de proporcionalidad.

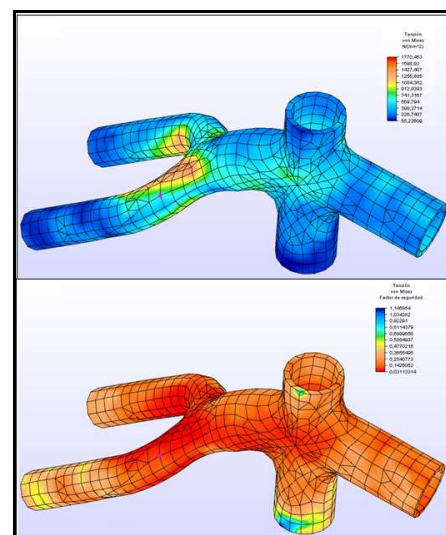


Figura 11. Desempeño mecánico de la unión a una caída desde una altura de 60 cm, se produjo la falla total.

En la grafica 12 se puede observar los gráficos de factor de seguridad de las demás uniones: la dirección, llanta trasera y pedales, las cuales obtuvieron valores de 2,06, 2,22, y 29, sin dificultad alguna para soportar el peso de una persona de 200 libras.

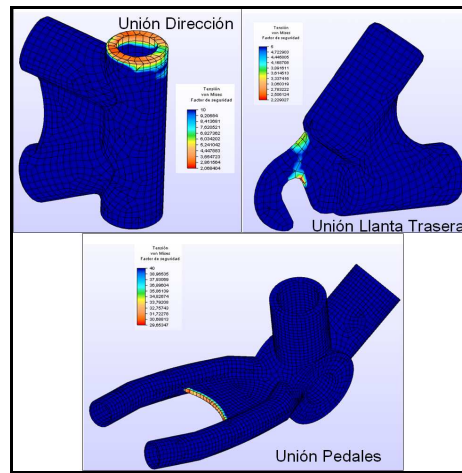


Figura 12. Desempeño mecánico, de las uniones, tenedor, pedales, llanta trasera.

6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta principalmente las restricciones de manufactura y costos de fabricación de las uniones de la bicicleta de bambú, y después de ubicar una variedad comercial de PP reforzado (Polypropylene Homopolymer Glass Fiber Reinforcement 30%), y realizar la respectiva validación del estado de esfuerzos y deformaciones a las condiciones de trabajo típicas de una bicicleta de turismo, se concluye que es susceptible fabricar uniones para bicicletas por moldeo por inyección.

El montaje de los marcos será más fácil que el de las uniones de CFRP, y resinas reforzadas con cáñamo, utilizando la uniones de PP reforzado con fibra de vidrio al 30% con agente de acople, siendo posible mejorar los tiempos de producción y facilitar la utilización del bambú para fabricar bicicletas o similares, en grandes volúmenes.

REFERENCIAS

- [1] ANDES NEWS. [On line] Chile. 2007 [consultado el 24 de junio de 2010] Disponible en <www.andesnews.cl/>
- [2] A Study on Laminated Bamboo Applies to Bicycle Frames. Ching-lin Hu, Graduate Institute of Textile Engineering. <http://ethesys.lib.fcu.edu.tw/>
- [3] Fajans J, Steering in bicycles and motorcycles, Department of Physics, University of California, Berkeley, Berkeley, California 94720-7300,1999.
- [4] Ashby, Michael F. Materials Selection in Mechanical Design, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1998.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.