

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UN INERMÓVIL CON ELEMENTO ESTRUCTURAL DE BAMBÚ

STUDY OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF AN IMMOBILE WITH BAMBOO STRUCTURAL PART

Gabriela Mayorga Santana ^{1*}

¹ Mecánica Automotriz. Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID:
<https://orcid.org/0009-0001-2223-388X>. Correo: mmayorga.istt@gmail.com

Marcelo Castillo Cárdenas ²

² Mecánica Automotriz. Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-5070-8849>. Correo: mcastillo1.istt@gmail.com

Andrea Razo Cifuentes ³

³ Mecánica Automotriz. Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-4457-3404>. Correo: arazo.istt@gmail.com

Franklin Fonseca Paredes ⁴

⁴ Mecánica Automotriz. Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-4493-8450>. Correo: ffonseca.istt@gmail.com

* Autor para correspondencia: mmayorga.istt@gmail.com

Resumen

La utilización de nuevos recursos naturales vegetales y el aprovechamiento de las propiedades del bambú es tendencia global. Por ello, en el presente artículo científico se analiza si las propiedades mecánicas del bambú logran un mejor desempeño estructural que el acero en un inermóvil. En efecto, la relevancia de ésta investigación es encontrar nuevos materiales amigables con el ecosistema que se pueda utilizar en el diseño mecánico y manufactura de inermóviles con las mismas o mejores prestaciones a menor costo. Así mismo, la población que se beneficia de esta investigación serán las personas que diseñan, elaboran y quienes cultivan y expenden dicho vegetal, por lo tanto, el método de investigación utilizado es el método cuantitativo. El artículo consta de las siguientes fases: recopilación de información de artículos científicos, comparación y análisis de datos expuestos con un enfoque deductivo es así como el bambú constituye un elemento bajo en

densidad que puede cuasi soportar los mismos esfuerzos de una estructura metálica de acero y se lo considera como material reciclable, sin embargo, la totalidad del material que compone la estructura no puede ser reemplazado por bambú debido a su baja resistencia a los esfuerzos de carga.

Palabras clave: bambú; inermóvil; resistencia de materiales; estructura; aerodinámica

Abstract

The use of new natural resources as well as bamboo properties as the main element for the structural design of an immobile. Analyzing bamboo physical properties and resistance in order to determine if weight is an important factor to achieve better aerodynamic performance in an immobile. This research becomes relevant so as to find new eco-friendly materials to be used for designing immobile vehicles with the same or better features at a lower cost. The people who design, develop and participate in competition events with this type of vehicle will benefit from this research. The research method used is the quantitative one. The present investigation consists of the following stages: collecting data from scientific articles, comparing and analyzing exposed information with a deductive approach. Bamboo, as a natural resource, is a low-weight element that can replace an equally resistant metal structure, and it is considered as a recyclable material, however, the entire material that makes up the structure cannot be replaced by bamboo due to its low resistance to load stress.

Keywords: bamboo; immobile; material resistance; structure; aerodynamics

Fecha de recibido: 03/02/2023

Fecha de aceptado: 29/05/2023

Fecha de publicado: 08/06/2023

Introducción

El desarrollo de esta investigación nació de la necesidad de encontrar nuevos recursos para la fabricación de inermóviles que se encuentren alineados con las políticas ambientales y de fabricación dentro de la industria automotriz. El material eco amigable que se utilizó para la fabricación del inermóvil fue el bambú, que es un vegetal que se desarrolla en los trópicos, localmente usado en la industria de la construcción, este uso llevó a cuestionar si las propiedades mecánicas del bambú igualan a las prestaciones del acero y determinar qué factores de ventaja y desventaja se puede presentar en su uso.

En los últimos años el bambú ha tomado un lugar importante como elemento estructural en las industrias. Para lo cual, se realizó una revisión bibliográfica de trabajos realizados acerca de la cadena productiva, propiedades mecánicas, pruebas de ensayo; que permitieron recopilar la mayor cantidad de información y poder comparar los resultados con las características estructurales del acero.

En el Ecuador se encuentran cinco variedades de bambú: *Arthrostylidium*, *Aulonemia*, *Chusquea*, *Guadua*, *Rhipidocladum*, de los cuales un 66.5% se encuentra en la Costa, un 10 % en la Sierra y un 23.5% en la Amazonía.

Las razones que le dieron relevancia al bambú son: su reproducción y crecimiento fácil, alta resistencia mecánica, peso ligero, bajo costo de producción primario y fácil transporte (factores que aportan al eje productivo), y en cuanto al eje ambiental el bambú tiene una alta capacidad de absorción de CO₂.

Con base en la información anterior el bambú se deduce que es un material idóneo para la fabricación de inermóviles y a partir de los ensayos en las unidades fabricadas ver un futuro panorama para otros usos del material descrito.

Materiales y métodos

Para la selección de las muestras, se toma en cuenta que el bambú hubiera pasado la mayoría de su ciclo biológico; la edad del bambú que localmente se llama guadua se determina mediante toma de muestras puesto que incide en sus propiedades mecánicas, (los culmos jóvenes menores de 3 años y los culmos viejos, mayores de 5 años, se desechan) (Sánchez, 2016).

En el estudio del desempeño mecánico de un inermóvil con elemento estructural de Bambú se somete el material a distintos esfuerzos y en distintas direcciones. Las pruebas de ensayo que se debe realizar son: compresión, tensión y flexión bajo la siguiente norma ISO:

- ISO22157-1 (Métodos de ensayo de los comportamientos mecánicos de la estructura de bambú).

Entre los factores principales a tomar en cuenta al momento de caracterizar este material es analizar la edad de la muestra de bambú siendo necesario realizar pruebas de colorimetría para determinarlo.

Para estudiar el comportamiento del material en un software de ordenador se basa en usar el método de elementos finitos en donde cada elemento es una ecuación que va en cascada sobre la siguiente, estas ecuaciones son:

Esfuerzo último de flexión:

$$\sigma_{ult} = F * L * \frac{D}{2} * \frac{1}{6} * I; \text{ MPa (ó N/mm}^2\text{)}$$

Donde:

σ_{ult} : Esfuerzo último de flexión (N/mm²)

F: Máxima carga aplicada (N)

L: Espacio libre entre apoyos (mm)

D: Diámetro externo (mm)

I: Momento de inercia (mm⁴)

Esfuerzo último de compresión

$$\tau = \frac{P}{A}$$

Donde:

τ : Esfuerzo último de compresión (Kg/cm²)

P: Carga última de compresión (Kg)

A: Área de la sección transversal (cm²)

Esfuerzo último de corte

$$\tau = \frac{P}{t \times l}$$

Donde:

τ : Esfuerzo último de compresión (Kg/cm²)

P: Carga última de compresión (Kg)

t x l: Área de la sección longitudinal

Esfuerzo último de tensión

$$\tau = \frac{P}{t \times a}$$

Donde:

τ : Esfuerzo último de compresión (Kg/cm²)

P: Carga última de compresión (Kg)

t x a: Área de la sección transversal

En la selección de materiales para ingeniería se usan paquetes informáticos que su interfaz es como la que se muestra en la figura:

*Es necesario realizar todas las pruebas con cada muestra de tallo joven, maduro y sobremaduro.

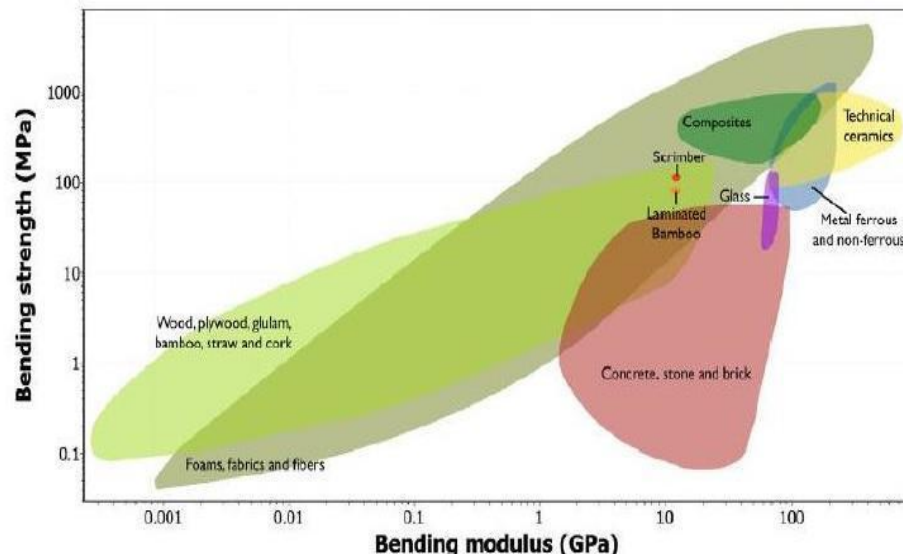


Figura 2. Gráfico del comportamiento de la Resistencia a flexión Vs. Módulo de flexión de diferentes materiales (metales, madera, cerámica, bambú). **Fuente** (CES, 2020).

Tabla 1. Tabla de propiedades mecánicas del bambú. Fuente: (UPV, 2018)

Propiedades Mecánicas	Promedio (MPa)	D.E. (MPa)	C.V.
Compresión paralela a la fibra			
Esfuerzo máximo	48.0	3.0	5%
Esfuerzo en el límite proporcional	36.0	2.0	6%
Módulo de elasticidad	19137	1625	9%
Compresión perpendicular a la fibra			
Esfuerzo máximo radial	5.0	0.6	12%
Esfuerzo máximo tangencial	6.8	0.9	13%
Tracción paralela a la fibra			
Esfuerzo máximo	132.0	24.1	18%
Módulo de elasticidad	17468	3655	21%
Tracción perpendicular a la fibra			
Esfuerzo máximo radial	1.1	0.3	22%
Esfuerzo máximo tangencial	1.8	0.4	21%
Corte paralela a la fibra			
Esfuerzo máximo	9.4	1.2	13%
Flexión			
Esfuerzo máximo radial	74.0	10.6	14%
Módulo de elasticidad radial	9523	1100	12%
Esfuerzo máximo tangencial	87.0	12.8	15%
Módulo de elasticidad tangencial	11456	1450	13%



Figura 3. Gráfico de propiedades mecánicas del acero en platinas.

Fuente: (SABIMET, 2012).

A partir de la obtención de datos de las propiedades mecánicas del bambú se comparó su comportamiento en la estructura mediante el método de elementos finitos mediante un mallado en las vigas que soportaron la carga y se localizó los puntos críticos de resistencia al someterlas a diferentes esfuerzos.

En la simulación se debe especificar el punto y valor de la carga a aplicar en la geometría del inermóvil. Esto se realizó tomando en cuenta el criterio de pruebas de ensayo ya realizados con muestra de la especie *Guadua Amplexifolia* que indica con base en los ensayos realizados que la zona que presenta mejores prestaciones es la sobrebasa (Sánchez, 2016). El inermóvil estará expuesto a los siguientes esfuerzos:

- **Esfuerzo de torsión:** se genera cuando sobre una porción de materia sólida en uno de sus extremos se ejerce torque sin llegar a su límite de fluencia en la mayoría de casos.
- **Esfuerzo de corte:** se genera cuando sobre una porción sólida se ejercen fuerzas antagónicas sobre un mismo plano llegando al límite de fluencia muchas veces.
- **Esfuerzo de flexión:** es generado por el propio peso del vehículo.
- **Esfuerzo de tracción/compresión:** es la fuerza generada por el vehículo cuando se frena y acelera.

Resultados y discusión

Se realiza una simulación por el método de elementos finitos para determinar el comportamiento mecánico del inermóvil con Acero ASTM A36 y Bambú. Para el análisis se determina los siguientes parámetros:

Tabla 2. Parámetros para Análisis estático.

Parámetro	Característica
Análisis	Estático
Malla	Malla de vigas
Número de elementos	780
Número de nodos	983

Análisis inermóvil - Acero ASTM A-36

Tabla 3. Propiedades físicas del modelo diseñado con Acero ASTM A-36.

Propiedades Físicas	Valores
Masa	29812,83 gr
Volumen	3797812,20 mm ³
Área superficie	4429600 mm ²
Carga	90 Kg

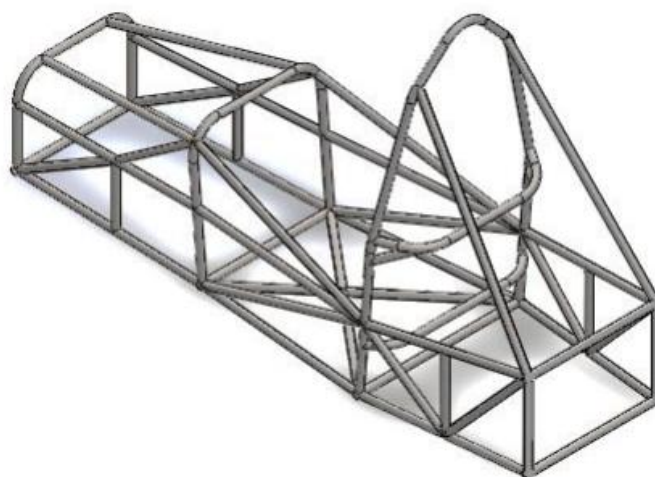


Figura 5. Gráfico de modelo diseñado con acero ASTM-36.

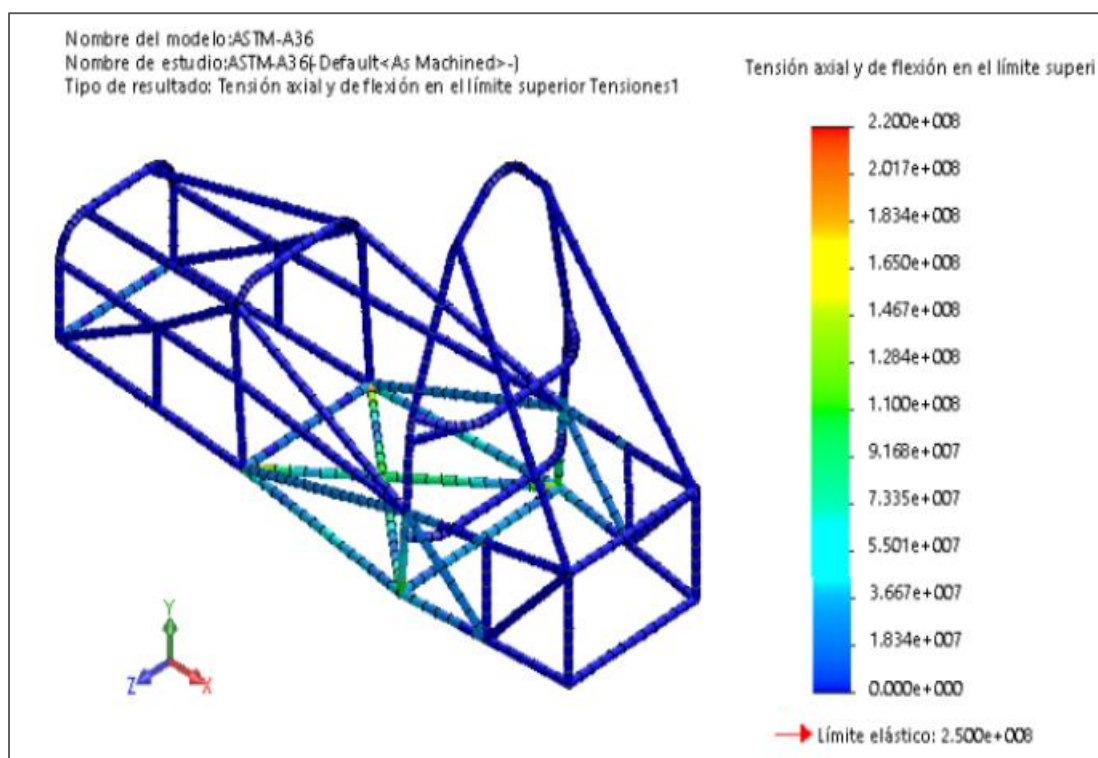


Figura 6. Gráfico de Análisis estático en prueba de flexión.

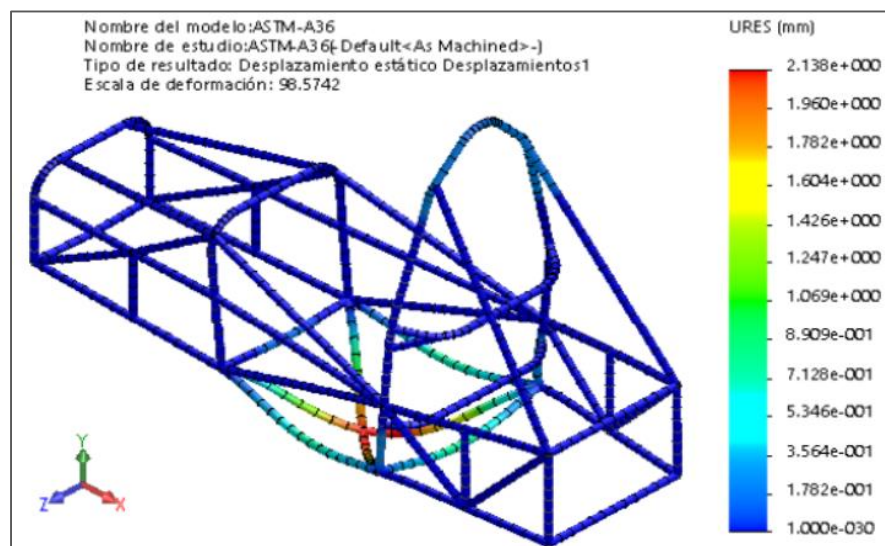


Figura 7. Gráfico de Análisis estático en prueba de deformación.

Análisis inermóvil material de bambú

Tabla 4. Propiedades físicas del modelo diseñado con Bambú.

Propiedades Físicas	Valores
Masa	2278,68 gr
Volumen	3797802,57 mm ³
Área superficie	4429600 mm ²
Carga	90 Kg

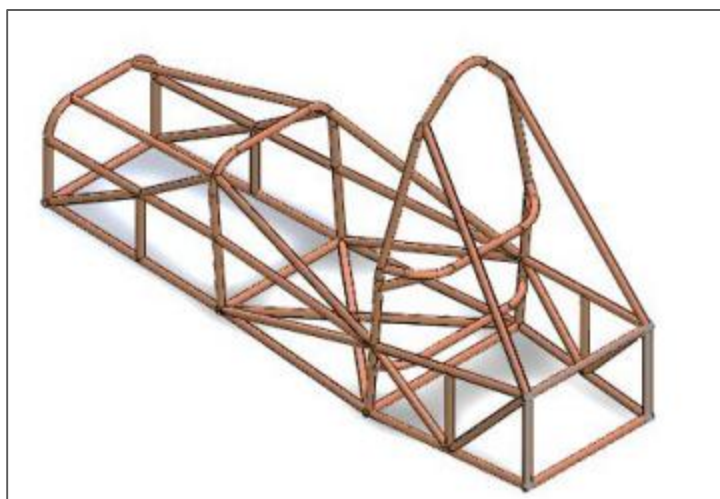


Figura 8. Gráfico de modelo diseñado con Bambú.

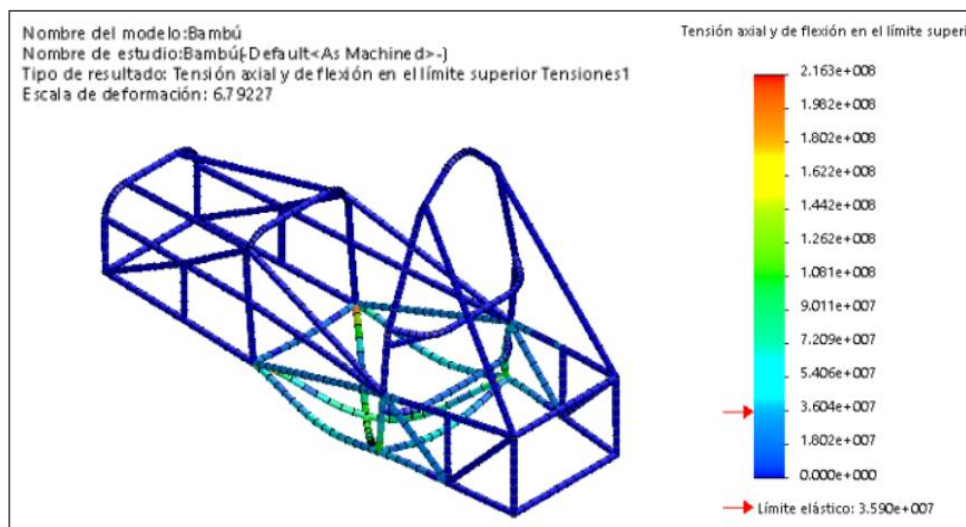


Figura 9. Gráfico de Análisis estático en prueba de tensión.

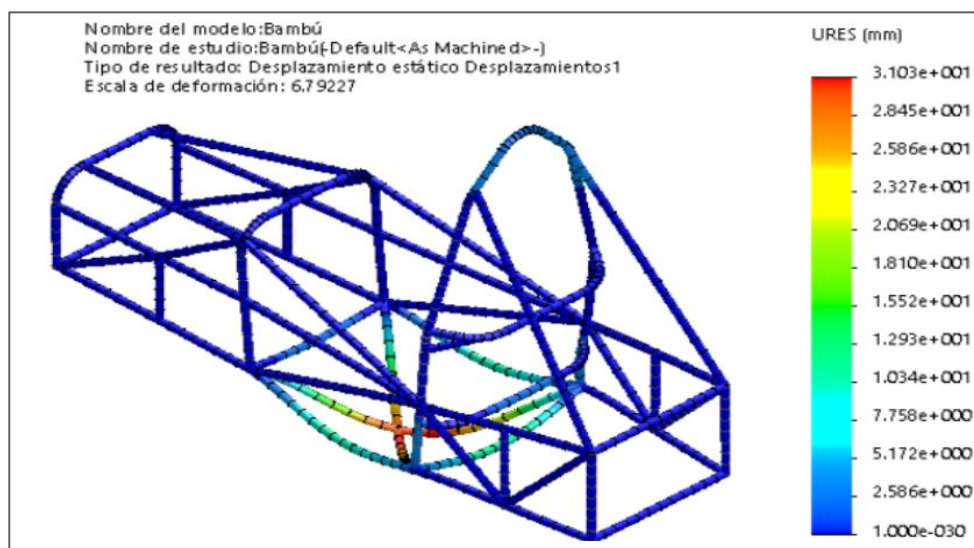


Figura 10. Gráfico de Análisis estático en prueba de deformación.

Discusión de resultados

Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis en prueba de tensión y deformación.

Parámetros	Valores obtenidos	
	Acero ASTM A-36	Bambú
Masa	29812,83 gr	2278,68 gr
Volumen	3797812,20 mm ³	3797802,57 mm ³
Límite Elástico	250 MPa	35,9 MPa

Esfuerzo normal de flexión	220 MPa	216 MPa
Factor de seguridad	1,1	0,17
Valor máximo de desplazamiento	2.14 mm	31.03 mm

En relación con los resultados expuestos se puede analizar que se puede optar por el bambú como material para la construcción de vehículos de tracción humana (VTH) debido a su propiedad de bajo peso específico y que además la resistencia a la flexión es similar en valor con el acero estructural promedio sin embargo hay que tomar las siguientes consideraciones:

- El acero estructural es un material isotrópico mas no así el bambú que es material anisotrópico, por consiguiente, el bambú no garantiza la resistencia a otros esfuerzos imprevistos que pueden generarse en otras direcciones y que podrían llegar a comprometer el conjunto del vehículo;
- El radio de giro que se ha de curvar el elemento estructural conlleva a otro problema puntual: si es un ángulo cerrado el que se requiere lograr prácticamente no habría opción a la extracción de material en la esquina interior del material lo que conllevaría a la merma de resistencia mecánica del elemento.



Figura 10. Extracción de material (Mora, 2015)

Es importante además señalar que prestaciones y que tipo de calzada va a rodar el vehículo esto se convierte en un aspecto fundamental si se quiere dar funcionalidad y una vida útil garantizada, la idea es señalar si va a ser un vehículo pistero o que va a circular de preferencia en el ámbito urbano donde se esperaría que la carpeta asfáltica sea uniforme y los desniveles no generen mayor esfuerzo y estrés en la estructura o por el contrario si es diseñado para caminos *off road* se esperaría que el diseño sea más robusto para de esta manera incrementar al factor intrínseco de seguridad se incremente y que no se llegue a modo falla, sin embargo esto conlleva a dos problemas de suma importancia que se expone a continuación:

- 1. Problemática de diseños robustos en la geometría:** al ser un material orgánico el bambú no se puede predeterminar con exactitud si los nodos del material coincidirán con la medida de corte, este problema conlleva a que la selección de material para las partes necesarias sea escogida en función de si coincide o no con la finalización de los nodos del material.

2. **Problemática de diseño robustos en sus juntas:** depende del diseño original del inermóvil o vehículo de tracción humana (VTH) donde probablemente se deba unir varias piezas de material lo que conllevaría a usar más elemento aglomerante como gomas especiales y que pese a su relativa efectividad (en estructuras estáticas) convertiría a la junta en un punto crítico o concentrador de esfuerzos que al verse sometidos a cargas cíclicas reduciría la vida útil del vehículo, este problema lleva a analizar con mayor cuidado soluciones.

Una de las probables soluciones es disminuir los elementos de unión en las juntas y para ello se ha hecho imprescindible analizar el trabajo de una colega de Colombia, en su trabajo “Curvatura del bambú y sus propiedades de flexión” donde exista una solución interesante para la problemática propuesta y es la siguiente: con un proceso de calentamiento al material por un determinado tiempo y luego aplicando carga para la flexión del elemento se logra obtener un elemento curvado, se describe en el trabajo que básicamente existen dos formas de flexionar los elementos de bambú: el primero es de manera artesanal calentando el material y flexionándolo de tal forma que se llegue aproximadamente al obtener el radio de curvatura requerido, sin embargo este método no garantiza que se llegue al límite plástico del material, se puede observar en la figura 10.

El otro método usado para lograr la flexión permanente del bambú es usar por intermedio de una máquina universal colocando la barra de bambú para flexión simple (dos puntos de apoyo) y ejerciendo carga puntual aproximadamente en el centro de la barra o donde necesite el diseñador el radio de giro, este procedimiento se puede apreciar en la figura 11 del presente artículo, cabe indicar que este método permite conocer la carga con la que está siendo atacada la barra y se puede monitorear en cualquier momento y de esta manera reducir o incrementar la carga en función del radio de giro que se necesite.



Figura 11. Fijado de forma artesanal - Flexión con máquina universal.

Fuente: (Mora, 2015)

Para un mejor análisis de los resultados obtenidos se presenta las siguientes gráficas:

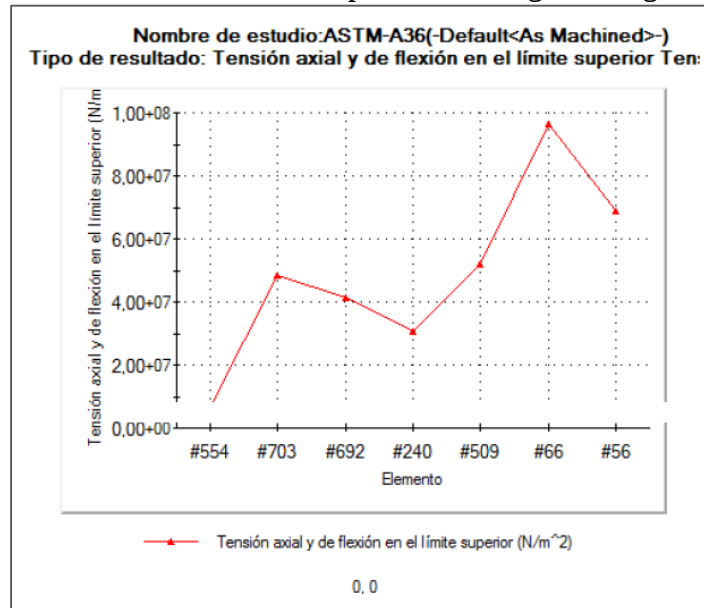


Figura 12. Gráfico de Tensión axial y de flexión en el límite superior (ASTM A-36).

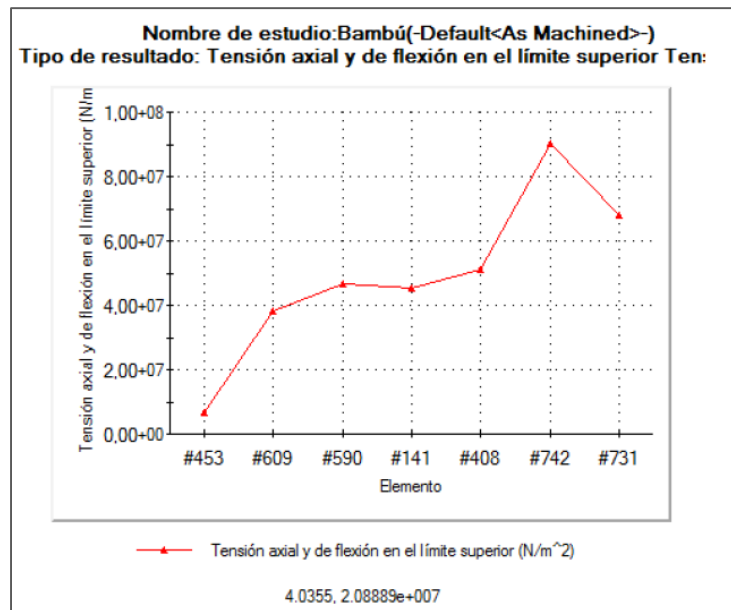


Figura 13. Gráfico de Tensión axial y de flexión en el límite superior (Bambú).

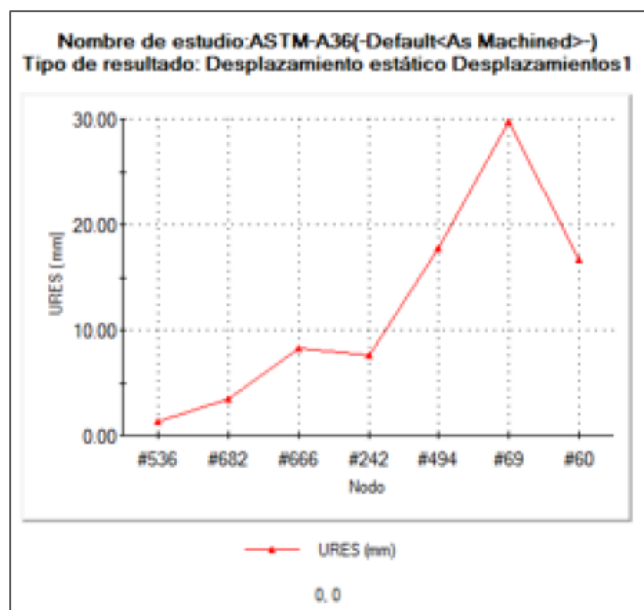


Figura 14. Gráfico de desplazamiento estático (ASTM A-36).

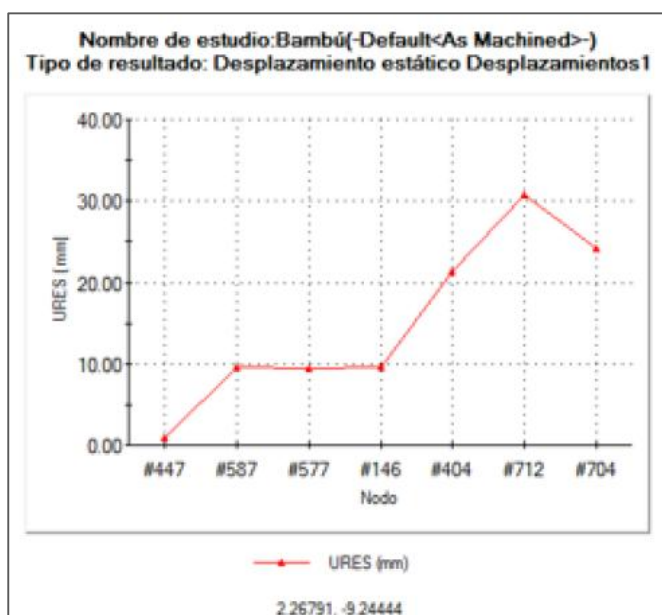


Figura 15. Gráfico de desplazamiento estático (Bambú).

Conclusiones

La fabricación del inermóvil en bambú reduce considerablemente el peso del vehículo con 2278,68 gr en relación al acero que constituye un peso de 29812,83gr lo que brinda mayor velocidad y potencia, sin embargo, a pesar de tener un peso relativamente menor en comparación con el acero este aspecto representaría una desventaja para el vehículo en algunos aspectos:

- el vehículo sería susceptible de ser arrastrado por vientos laterales imprevistos
- se generaría momentos en los tres ejes de gran valor lo que generaría inestabilidad para la maniobra del piloto
- los momentos o torques como el de guiñada, el de cabeceo o de frenada generarán esfuerzos importantes en los elementos mecánicos de coyuntura, de los tres items anteriores se desprende que para contar con un inermóvil o vehículo de tracción humana estable se ha de combinar acero y bambú.

El peso de carga aplicado de 90 Kg en la estructura de bambú genera un desplazamiento estático de 31,03 mm, éste valor supera el límite del factor de seguridad que es 0,17mm sobrepasando el límite de fluencia del material.

Para lograr un diseño óptimo se debe realizar una combinación de acero y bambú tomando en cuenta que las vigas de acero a reemplazar no estén en contacto con los elementos que soportan la carga máxima.

Es importante generar elementos estructurales curvos usando el segundo método de flexión para de esta manera menorar el número de juntas.

Referencias

- Jácome, P. (2020). Simposio Internacional del Bambú y la Guadua, "Consolidando regiones desde la Mitad del Mundo". Ciencia, 22, 7-8.
- Pérez, D. (2021). Evaluación y comparación de resitencia a la tracción y flexión de Quiote del Maguey Manso (Agave Salmiana) contra bambú Guadua. Ingeniería, Investigación y Tecnología, XXII (número 3), 1-6.
- Rodríguez, J. C. (2006). El bambú como material de construcción. Conciencia tecnológica, 31, 67-69.
- Sánchez, M. (2016). El bambú como elemento estructural: la especie. Revista Electrónica Nova Scientia, 657-677.
- Ticona, J. (2019). Evaluación de la propagación de Bambú (Guadua angustifolia Kunth y Gudua angustifolia de color) con diferentes segmentos vegetativos, en la estación experimental sapecho. Revista de Investigación e Innovación Agropecuria y de Recursos Naturales, 6, n°1, 16-23.
- Mora, L. (2025). Curvatura del Bambú: Proceso, propiedades de flexión y aplicación en la ingeniería mecánica, 40-50.
- Ospina, J. (2019). Evaluación de la resistencia a la fatiga de marcos de bicicletas hechos de bambú.
- Sánchez, R. (2021). Comportamiento a flexión de una viga de concreto reforzada con bambú guadua.

- Yaselga, J. (2018). Selección de un material alternativo sostenible para una viga de acero estructural en la construcción utilizando un análisis de ciclo de vida, métodos multicriterio y simulación de esfuerzos-deformación para optimizar el material.
- Deras, J. (2003). La cadena productiva del. Recursos Naturales y Ambiente/no., 127-136.
- Fonseca, W. (2016). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. Ambiente y Desarrollo, 85-98.
- González, H. (2007). Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie Guadua angustifolia Kunth. Scientia et Technica Año XIII, 503-508.
- Hernández, S. (2021). Colorimetría de los tallos del bambú (guadua angustifolia) en tres estados de madurez. Maderas, Ciencia y tecnología, 1-10.
- Hernández, Y. (2021). Torsión, esfuerzos y deformaciones. TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río, 43-47.
- Medina, J. (2018). Diseño, fabricación y comercialización de bicicletas en madera “Gaia-Bikes” en Bogotá. 20-35.