

# **APORTACIONES DEL LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DE LA FACULTAD DE ARQUITECTURA DE LA UNAM PARA LA APLICACIÓN DEL BAMBÚ AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO Y ESTRUCTURAL**

Ontiveros H. Marcos<sup>1</sup>; Trujillo B. Magdalena<sup>2</sup>; Hernandez H. Agustín<sup>1</sup>; Oliva S. Gerardo<sup>1</sup>;  
*Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F.*

*1) Laboratorio de Estructuras, Facultad de Arquitectura*

*2) Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, Facultad de Ingeniería,*

*arq-ontiveros@comunidad.unam.mx; trujbar@unam.mx; ahh@unam.mx; jgos@unam.mx*

Tel. 5622 0700

## **PALABRAS CLAVE**

Estructuras, construcción, materiales, desarrollo tecnológico, bambú

## **RESUMEN**

En este trabajo se presentan las aportaciones, que el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM ha logrado, a través de varios proyectos de investigación y el diseño de tres proyectos con estructura de bambú, en combinación con otros materiales de uso común. Los resultados obtenidos se fundamentan a través de un número considerable de pruebas mecánicas, realizadas de acuerdo a la normatividad internacional; de análisis microscópicos, del monitoreo de estructuras ya existentes construidas con bambú y de la experimentación con compuestos poliméricos reforzados con fibra de bambú. El grupo de investigación conformado por profesores y estudiantes de las facultades de Arquitectura y de Ingeniería de la UNAM, tiene como objetivo justificar, promover y difundir el uso del bambú como un material estructural altamente sustentable, confiable. Su uso y aplicación deben regularse oficialmente y ya se cuenta con los resultados de los procesos de experimentación científica, que justifican y avalan la aplicación del bambú en el diseño arquitectónico y estructural.

## **ABSTRACT**

This paper presents the contributions that the Structures Laboratory of the Faculty of Architecture of the UNAM has managed, through various research projects and designing three projects with bamboo frame, in combination with other materials commonly used. The results are based through a considerable number of mechanical tests, conducted according to international standards; microscopic analysis, monitoring of existing structures built with bamboo and experimentation with fiber reinforced polymer composites of bamboo. The research group formed by professors and students from the faculties of Architecture and Engineering of the UNAM, aims to justify, promote and spread the use of bamboo as a highly sustainable. Its use and application must be officially regulated and already exist the results of the research process

and scientific experiments conducted at the Structures Laboratory, which justify and support the application of bamboo in the architectural and structural design.

## INTRODUCCIÓN

Las posibilidades de la construcción con bambú, poco a poco ha ganado terreno en nuestro país, sin embargo, esto ha sido mediante esfuerzos focalizados de diseñadores y constructores, en la mayoría de los casos, impulsados por una conciencia social y ambientalista, aprovechando las cualidades del bambú. Sin embargo, para que realmente se pueda explotar su potencial a una escala significativa, hace falta integrar el escenario económico.

Es consabido que ninguna inversión en el sector inmobiliario se realiza cuando impera la incertidumbre, en el caso del bambú la incertidumbre en las capacidades del material para resistir a las cargas de trabajo y el tiempo de uso; situación que deriva en la incertidumbre del reconocimiento legal como un material de construcción seguro, que pueda ser diseñado y avalado bajo parámetros normativos oficiales.

Al ser un material natural, para darle certidumbre a una inversión inmobiliaria, no es conveniente copiar parámetros de diseño o códigos extranjeros, siendo aconsejable contar con datos duros específicos del material que se va a utilizar, que avalen tanto el procedimiento de diseño estructural, como el sistema constructivo. Estos datos, en su conjunto, son el conocimiento que puede respaldar una normatividad de aplicación general.

Por lo anterior, un grupo multidisciplinario de investigadores y profesores de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo proyecto de investigación “Arquitectura sustentable con definición de patrones de comportamiento estructural en materiales y sistemas estructurales actuales”, se ha dado a la tarea de acotar esas incertidumbres y desarrollar procedimientos prácticos, coadyuvando a la generación del conocimiento técnico y práctico del bambú mexicano, específicamente del que se cultiva en la zona de Huatusco, Veracruz; con la finalidad de darle certidumbre a un producto socialmente asequible, ecológicamente responsable y seguro en su aplicación y como inversión económica.

Sólo logrando lo anterior se podrá hablar de sustentabilidad y de una naciente industria de la construcción con bambú en México, antes de ello sólo seguirá siendo una anhelada posibilidad, repleta de bellos ejemplos. Con este enfoque, la investigación que ahora se presenta, se dirigió principalmente hacia el objetivo de la innovación y aplicación del bambú en la industria de la construcción, bajo las cinco líneas siguientes:

1. La caracterización de tres especies de bambú cultivadas en Huatusco, Veracruz.
2. El análisis de resultados y metodología para determinar esfuerzos de diseño del bambú.
3. El monitoreo de sistemas y estructuras existentes.
4. La aplicación en proyectos ejecutivos de estructuras ligeras.
5. La generación de nuevas aplicaciones tecnológicas con bambú.

## 1. LA CARACTERIZACIÓN DE TRES ESPECIES DE BAMBÚ CULTIVADAS EN HUATUSCO, VERACRUZ

Con base a una selección de especies de bambú comúnmente utilizadas en construcciones informales y que por sus características presentaban el mejor potencial de utilización como material estructural, se determinó obtener las propiedades físicas y mecánicas de tres especies de bambú cultivadas en la zona de Huatusco, Veracruz; por la empresa Bambuver AC, a saber:

- o *Guadua angustifolia*,
- o *Phyllostachys bambusoides* (Madake)
- o Oldhami

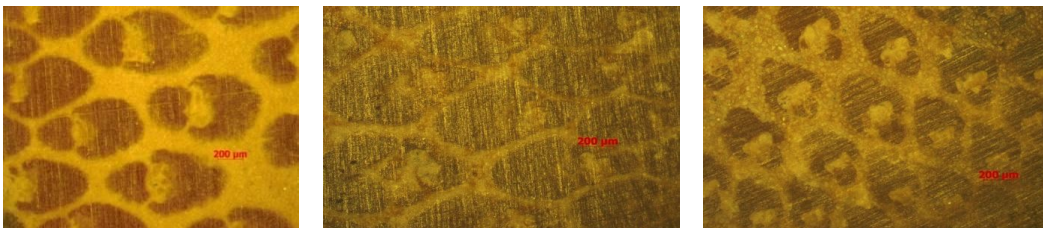
Para que los resultados obtenidos pudieran tener validez a nivel nacional e internacional y con la finalidad de que las especies estudiadas pudieran ser aceptadas como material grado ingeniería para la industria de la construcción y aplicarse a otros productos, se realizaron cientos de pruebas apegadas a la norma la Norma ISO-22167, publicada por la Red Internacional para el Bambú y el Ratán, INBAR; en el año de 2004.

Dicha norma establece pruebas de: contenido de humedad, medición de masa y volumen, encogimiento después del secado, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia al cortante y resistencia a la flexión (en proceso), las cuales se aplicaron en las zonas bajas, medias y altas de cada especie.



Ensayos de cortante, compresión y tracción de bambú

Conjuntamente con las pruebas mencionadas, se realizaron estudios de microscopía óptica para establecer parámetros de relación entre los resultados de las pruebas mecánicas y las características cualitativas de su estructura interna, con miras a implementar procedimientos de control de producción, prácticos y económicos, para la selección de bambú rollizo, dentro de un estándar de calidad medible, sin tener que realizar las extenuantes pruebas mecánicas a cada lote de material.



Microscopía óptica (internodos, transversal) a) Guadua Agustifolia; b) Oldhamii; c) Madake

Los pormenores y resultados finales de estas pruebas están por publicarse en revistas científicas especializadas, donde se hace notar el excelente desempeño mecánico del Oldhamii, incluso superando en varias pruebas a la Guadua Angustifolia y la congruencia de estos resultados con las densidades y proporciones entre fibra y parénquima de las distintas especies observadas bajo el microscopio. Estos resultados sumados a una correcta selección de cúmulos y un sistema constructivo adecuado podrían garantizar su uso como material estructural.

## 2. EL ANÁLISIS DE RESULTADOS Y METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ESFUERZOS DE DISEÑO DEL BAMBÚ.

Bajo un enfoque práctico no sólo basta con tener datos duros, sino que es necesario generar los procedimientos para su aplicación. En el caso del bambú, los datos de la investigación científica arrojaron rangos muy amplios de capacidades de carga, los cuales debieron ser analizados y factorizados de acuerdo a las mejores prácticas y las teorías sobre materiales compuestos, para deducir la conducta estructural y sintetizarla en valores útiles, aplicable de forma directa al diseño de los diversos componentes estructurales de los sistemas constructivos, dentro del rango de seguridad y aprovechando al máximo las capacidades del material.

Como toda propuesta nueva, la metodología desarrollada no nace como un análisis definitivo, sino que resulta de un proceso evolutivo que se nutre gradualmente con argumentos analíticos interpretados de manera creativa. Sin embargo, aun no siendo definitiva, se considera que proponer esta herramienta, contribuye de manera directa a mejorar la práctica de la construcción con bambú en México.

Para deducir la conducta del bambú se determinaron tres esfuerzos característicos a partir de las gráficas de esfuerzo/deformación obtenidas en las pruebas mecánicas, estos son: el esfuerzo último, máximo y de fluencia. La prudencia aconseja someter el material a una intensidad menor al esfuerzo de fluencia, la cual llamamos esfuerzo de diseño. En arquitectura, dicho principio ha resultado efectivo por la incertidumbre inherente sobre los procesos constructivos, la calidad de los materiales y la magnitud hipotética de cargas tanto permanentes como eventuales, durante la vida esperada de la estructura.

Por lo anterior existe la necesidad impostergable de definir un esfuerzo de diseño para el bambú existente en México, con relación a su propio coeficiente de seguridad “n”. Sin embargo, en el caso de materiales compuestos, anisótropos y heterogéneos; determinar los factores que deben afectar los datos obtenidos en las pruebas directas, a fin de encontrar estos esfuerzos de diseño, resulta el problema focal. Para ello se optó por aplicar el llamado “método del desplazamiento”, en analogía a soluciones obtenidas para otros materiales compuestos. Como se puede inferir la metodología desarrollada se basa en la geometría de los diagramas, vinculada con la conducta del material. Con éste enfoque se trató de deducir los esfuerzos de diseño de la mejor forma.

Como síntesis de la investigación, se diseñó una tabla próxima a publicarse con los resultados cuantitativos completamente nuevos, dirigido especialmente al campo del diseño arquitectónico y

estructural, vinculada a los géneros estudiados. Para efectos de cálculo, estos esfuerzos de diseño varían de manera natural según la especie.

### 3. MONITOREO DE SISTEMAS Y ESTRUCTURAS EXISTENTES

Generada la teoría de análisis estructural con bambú, el paso lógico es ponerla a prueba con el monitoreo de tres construcciones existentes, dos en el Parque Estatal Flor del Bosque de Puebla y una en el Instituto Municipal de la Juventud de Puebla, proyectos del arquitecto Ricardo Leyva. Con ello se busca crear una metodología para articular el proceso de diseño con la técnica de construcción y de cálculo con el fin de estimar esfuerzos y deformaciones reales.

Durante el monitoreo, el primer problema que se debe enfrentar son las diferencias significativas entre los planos de proyecto y la obra ejecutada, presumiblemente a la falta de elementos de control tanto para la etapa de diseño como para la obra.



Monitoreo de construcciones existentes con estructura de bambú

El proceso de monitoreo y evaluación permitió identificar la manera de controlar diversos componentes desde la etapa del diseño, donde el “surco” y el eje del tallo, resultan fundamentales, ya que cuando se desprecian, se pierde fácilmente el control geométrico del sistema.

También basándose en pruebas de aplastamiento, se identificaron patrones de comportamiento, lo que permite interpretar las hendiduras y tener una referencia para asociarlas respecto a cada especie, determinando si se dieron por manejo del material, por esfuerzos mecánicos, durante el proceso constructivo o por intemperie.

Durante la evaluación se identificó que el buen desempeño de las conexiones, depende más de su calidad, que del material empleado, es decir, si se hace una construcción sin control aparecen fallas prematuras que limitan el comportamiento estructural.

Además de lo anterior, se practica un monitoreo ambiental de los elementos estructurales al exterior, así como aquellos que están más cercanos al suelo, buscando determinar cómo afecta el diferencial de temperatura y humedad respecto a los situados en el interior, con relación al deterioro y al comportamiento estructural. Pese a resultar evidente que el bambú es susceptible al

sol y a la humedad, este estudio permitirá establecer tolerancias entre los distintos elementos constructivos de cubierta, entrepiso, estructura soportante y desplante.

#### 4. APLICACIÓN EN PROYECTOS EJECUTIVOS DE ESTRUCTURAS

Cada material de construcción, de acuerdo a sus características, tiene su propio lenguaje formal. Para las personas afines a la construcción, es relativamente fácil distinguir el sistema y material constructivo con tan solo con ver un dibujo en planta de un edificio, de la misma manera las estructuras de bambú rollizo han desarrollado su propia morfología que aprovecha y potencializa sus capacidades estructurales. Básicamente podemos hablar de dos posibilidades: por un lado, estructuras reticulares en forma de red que, configuradas con una geometría eficiente, resultan en un sistema ligero donde toda la membrana trabaja de forma integral con gran potencial formal y por otro lado, estructuras que sumando cúmulos de bambú conforman elementos individuales de gran resistencia como vigas, arcos o columnas.

Como salida de aplicación, dentro del Laboratorio de Estructuras, se han utilizado estas dos posibilidades en la realización de proyectos ejecutivos, tanto de carácter experimental, como para la iniciativa privada, con las condicionantes que cada sector exige, ejemplo de ello son: el Pabellón UNAM; el Proyecto Isla de la Pasión y el Proyecto del Pabellón Huatusco.



Pabellón de Bambú UNAM y maqueta del pabellón de Huatusco

Para el proyecto de la Isla de la Pasión se diseñaron dos prototipos para una serie de bungalows en un hotel por construirse en la Isla de Cozumel, donde se plantearon dos posibles aproximaciones; por un lado, tratarlos como cualquier inmueble que soporte las condiciones de vientos de huracán, o considerarlo como una estructura temporal que se renueva periódicamente.

Esto plantea la disyuntiva de una estructura de gran resistencia y una expectativa de vida larga, lo que implica una inversión inicial fuerte costos de mantenimiento constantes, siempre con el riesgo de verse afectado por la fuerza de la naturaleza o por otro lado una estructura que sea tratada como un recubrimiento, en donde sea aceptable su pérdida dentro de los costos de utilización.

Al final, se optó por la primera opción, resultando una estructura híbrida reforzada con aluminio y acero inoxidable, que cumplía con las normas de seguridad de cualquier estructura con sus características de uso y ubicación. Independiente de lo acertado o no del enfoque, se logró diseñar un proyecto ejecutivo utilizando el bambú, para una de las firmas de arquitectos más importantes de México y con las condiciones impuestas por los inversionistas y que deben soportar vientos de hasta 240 km por hora.



Proyecto Isla de la Pasión diseño del despacho Sordo Madaleno  
Desarrollo de la ingeniera de bambú Bambuver – Laboratorio de Estructuras UNAM

## 5. GENERACIÓN DE NUEVAS APLICACIONES TECNOLÓGICAS CON BAMBÚ. COMPUESTO POLIMÉRICO CON FIBRAS DE BAMBÚ

Los plásticos son materiales de gran importancia, el rango de productos que pueden ser fabricados en plástico es muy amplio y la facilidad para procesarlos, así como sus propiedades mecánicas, los hace un material atractivo para aplicaciones industriales. Sin embargo, hoy en día existen nuevos materiales que compiten con el plástico y que se diseñan para optimizar recursos humanos, de materia y económicos, buscando la sustentabilidad. Dentro de estas posibilidades es común encontrar materiales combinados, entre plásticos, metales y cerámicos, llamados compuestos, que constituyen la materia prima en partes estructurales. Por lo general, uno de estos materiales presentará propiedades bajas mientras que el otro, llamado de refuerzo, tendrá características contrarias, que al unirse se complementan y forman materiales únicos en su especie.

El refuerzo en forma de fibra es el más utilizado para aumentar la rigidez de un material blando o de limitadas características mecánicas. Así es como a la luz del estudio mecánico del bambú,

surgió la idea de determinar la viabilidad de las fibras de bambú como agente reforzante en una matriz de polipropileno, como sustituto a fibras sintéticas; con la finalidad de transferir algunas de las propiedades mecánicas del bambú a la matriz de polímero y reducir el costo del compuesto, reutilizando un material que originalmente se consideraba como desecho.

Este desarrollo de nuevos materiales puede jugar un papel muy importante para la protección del medio ambiente y generar un mejor aprovechamiento de las materias primas fósiles. Es aquí en donde los polímeros reforzados con fibras naturales, adquieren importancia, ya que si bien, las propiedades de los polímeros que forman parte del compuesto se ven modificadas, existen algunos argumentos de gran importancia para el uso de este tipo de materiales compuestos como:

- Menor costo
- Menor densidad (reducción significativa del peso)
- Menor abrasión de las herramientas de moldeo
- Menor emisión de contaminantes y menor energía necesaria en la obtención de las fibras

Las características que hacen a las fibras de bambú un candidato ideal para un bio-compuesto son:

- Es un material compuesto en su estado natural, formado por fibras de celulosa embebidas en una matriz de lignina.
- A diferencia de otras fibras naturales el bambú no posee resinas, lo que favorece la adhesión con otros materiales.
- Su composición química es similar a la de la madera sin embargo tiene propiedades físicas diferentes que pueden ser explotadas en nuevos productos.
- Mantiene la densidad de las fibras naturales oscilando entre 1.25-1.5 [g/cm<sup>3</sup>], convirtiéndolas en una opción viable para aplicaciones industriales, siendo menor a la de las fibras sintéticas comúnmente utilizadas como refuerzos e incluso menor a los 2.54 [g/cm<sup>3</sup>] de la fibra de vidrio y al 1.8 [g/cm<sup>3</sup>] de las fibras de carbono.

Por otro lado, el polipropileno es uno de los polímeros más versátiles en la industria, y es uno de los polímeros termoplásticos de mayor producción mundial, del cual podemos resaltar su bajo coeficiente de absorción de humedad, ligereza alta resistencia y nula toxicidad.

Actualmente la investigación está en sus primeras fases y el desarrollo gira en determinar las propiedades adquiridas por el polímero matriz, para lograr su compatibilidad. Las fibras que se utilizaran son una mezcla de distintos tipos de bambú originalmente considerados materia de desecho, dichas fibra fueron proporcionadas por la empresa Bambuver A.C. localizada en Huatusco Veracruz. Debido a que estas fibras son recuperadas de otros procesos, podemos resaltar que tanto los costos financieros y ecológicos se verán disminuidos al reemplazar la fibra de vidrio por fibras orgánicas.

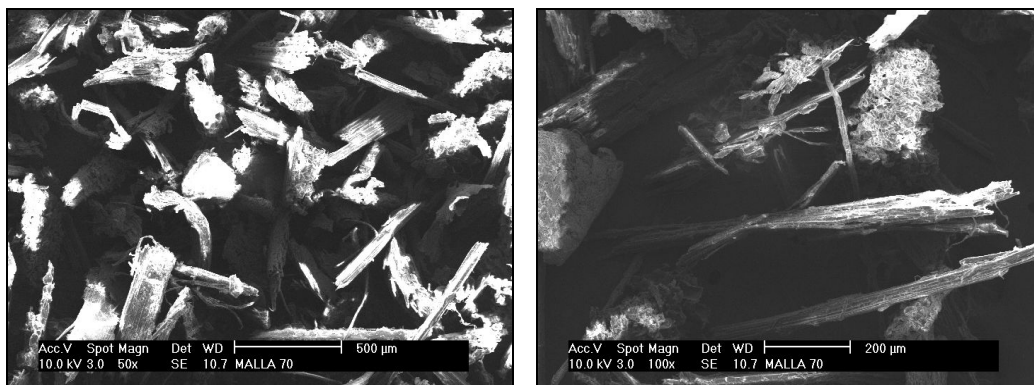


El proceso de preparación básicamente implica la separación y clasificación por tamaño de partícula y la remoción de humedad; mediante cribado y horno respectivamente.



Equipo de cribado, horno de secado, control y clasificación de las fibras de bambú

Los resultados obtenidos al momento son alentadores y se están realizando pruebas mecánicas donde se espera que las propiedades del polipropileno sean superiores a las de materiales convencionales económicos. Mucho de esto tiene que ver con el tamaño de la partícula que se selecciona; por ello fue necesario medir los tamaños de ellas bajo la microscopía electrónica, como se muestra a continuación



Partículas obtenidas con malla ASTM No 70.

## CONCLUSIONES

Este proyecto de investigación busca que los resultados se puedan aplicar a la práctica profesional, en vías de que el nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, próximo a publicarse, promete contemplar al bambú como material para construir.

Respecto al diseño estructural con bambú este fundamenta en series sistematizadas de pruebas mecánicas y físicas, de manera preliminar podemos dividir el alcance de la investigación en dos temas; primero respecto a los materiales, donde se propuso una metodología para definir los esfuerzos de diseño de las tres especies de bambú más empleadas en México para la construcción (*Guadua angustifolia*, *Madake* y *Oldhamii*) con sus respectivos módulos de elasticidad, asimismo

se identificó que debido al grado de aleatoriedad entre los comportamientos, es importante relacionar los resultados cuantitativos con los cualitativos, dicha metodología condujo a identificar que la especie *Oldhamii* ofrece una conducta con mayor regularidad.

Es bambú un material muy viejo, pero nuevo en su aplicación, ya que le estamos dando funciones nuevas, por lo que el enfoque como material de construcción debe buscar su propia esencia, enfoques distintos para distintos materiales, No se debe diseñar bambú como si fuera acero o concreto, más bien es aconsejable seguir la tendencia que actualmente impera en los nuevos materiales compuestos, donde se diseñan los materiales de acuerdo a las posibles aplicaciones.

En la Universidad Nacional Autónoma de México se ha hecho un esfuerzo en un pequeño nicho del amplio espectro del bambú en México, pero solo sumando este tipo de esfuerzos e instituciones se podrá avanzar con el tema. Por lo pronto queda abierta la puerta para adicionar más especies y ubicaciones y descifrar las propiedades del bambú cultivado en otras partes de nuestro país.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ramanajua Rao, R.Gnanaharain, *Bamboos Current Research*, Canada 1990, International Development Research Centre.
- [2] V.Amigo, M.D. Salvador, comportamiento mecánico de polietileno de alta densidad reciclado reforzado con fibras naturales., Tenth international conference on non conventional materials and technologies., Cali Colombia 2008.
- [3] Ashby M.F., Shercliff H. and Cebon D., *Materials, engineering, science, processing and design* (ed.) Butterworth-Heinemann, 2014.
- [4] López Muñoz, L. F., NORMAS DE CONSTRUCCIÓN CON BAMBU: Un desafío para América Latina. 2013, LAC-Newsletter-INBAR-No.37-BR-2013, Issue 37, pp. 12-13.
- [7] Oliva J.G., Hernández A., Ontiveros M., Trujillo M. Bamboo architecture, new proposals for sustainable design. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) and the 6th. Latin American Tensile Structures Symposium (SLTE). Brasilia, Symposium IASS-SLTE 2014.
- [8] Ordóñez Candelaria, V. R., Perspectivas del bambú para la construcción en México. *Maderas y Bosques*, 1999,.1(5), pp. 3-12.
- [9] Ordóñez Candelaria, V. R. & Bárcenas Pazos, G. M., Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas. 2014,.*Madera y Bosques*, 20(2), pp. 111-125.
- [10] Internal report “Faculty of Engineering-Faculty of Architecture, UNAM”, PAPIIT IG 401014 project “Arquitectura sustentable con definición de patrones de comportamiento estructural en materiales y sistemas estructurales actuales”, 27 September 2013.