

EL BAMBÚ TONKIN (*Pseudosasa amabilis*) COMO MATERIAL A EXPLORAR EN EL ECODISEÑO. EL DISEÑO DE UN PUESTO DE MERCADO COMO CASO DE ESTUDIO

TONKIN BAMBOO (*Pseudosasa amabilis*) AS A MATERIAL TO EXPLORE IN ECODESIGN. THE DESIGN OF A MARKET STALL AS A CASE STUDY

*Óscar González-Yebra*¹

<http://orcid.org/0000-0003-2258-3967>

*Adrián Lozano Rey*²

<http://orcid.org/0000-0003-1643-7795>

*Alfredo Tolón Becerra*³

<https://orcid.org/0000-0002-7420-3340>

*Caori P. Takeuchi*⁴

<https://orcid.org/0000-0002-6273-7118>

RESUMEN

El análisis del ciclo de vida (ACV) permite evaluar el impacto ambiental en las diferentes etapas de un diseño/producto. En el caso de la etapa de selección de materiales, entre las materias primas que tienen un mayor impacto ambiental y alto consumo energético se encuentra el acero. En este contexto, en esta investigación se estudia el uso de *Pseudosasa amabilis* (bambú Tonkin) como material estructural y estrategia de Ecodiseño, se compara su impacto medioambiental con el del acero en un rediseño de un puesto de mercado para frutas y verduras. Para llevar a cabo el proceso de diseño, se ha trabajado bajo el enfoque de Diseño para la Sostenibilidad (D4S) con la herramienta SolidWorks®, en la que se ha desarrollado el diseño de detalle, incluyendo el estudio del comportamiento estático y ACV, es decir, el estudio de la sostenibilidad de la estructura en el marco del nuevo paradigma de la Economía Circular. Se realizó el rediseño con bambú Tonkin, a partir de un muestreo que arrojó unos datos medios de 30 mm de diámetro y espesor de 6 mm. Los resultados obtenidos, de forma teórico-experimental y con la simulación numérica, confirman que el bambú Tonkin tanto en el análisis de elementos finitos (FEA) como en el estudio de sostenibilidad (ACV), es un material con unas excelentes cualidades estructurales a la vez que tiene un impacto medioambiental mínimo. Es por ello, que se proponen nuevas líneas de trabajo y se invita a otros grupos de investigación a que se interesen sobre este material verde desconocido.

Palabras clave: Bambú, *Pseudosasa amabilis*, Innovación impulsada por el diseño, Análisis de ciclo de vida, Economía circular, Ecodiseño, Herramientas CAD/CAE.

¹Universidad de Almería (UAL). Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología Agroalimentaria (CIAMBITAL). Almería, España.

²Asociación Ibérica del Bambú (AsIB). Madrid/Lisboa, España/Portugal.

³Universidad de Almería (UAL). Escuela Superior de Ingeniería. Almería, España.

⁴Universidad Nacional de Colombia (UNAL). Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

*Autor de correspondencia: oglezyebra@ual.es

Recibido: 12.12.2022 Aceptado: 07.08.2023

ABSTRACT

The life cycle analysis (LCA) allows to evaluate the environmental impact in the different stages of a design/product. In the case of the material selection stage, among the raw materials that has a high environmental impact and energy consumption is the steel. In this context, this research studies the use of *Pseudosasa amabilis* (Tonkin bamboo) as a structural material and an Ecodesign strategy, it compares its environmental impact with that of steel in a redesign of a market stall for fruits and vegetables. To carry out the design process, the study worked under the Design for Sustainability (D4S) approach with the SolidWorks® tool, in which the detailed design has been developed, including the study of the static behavior and ACV, that is, the study of the sustainability of the structure within the framework of the new paradigm of the Circular Economy. The material selected for the redesign is a Tonkin bamboo, from a sampling that threw average data of 30 mm in diameter and thickness of 6 mm. The results obtained, theoretical-experimentally and whit the numerical simulation, confirm that the Tonkin bamboo, both in the finite element analysis (FEA) and in the sustainability study (ACV), is a material with excellent structural qualities as well as minimal environmental impact. For this reason, new lines of work are proposed and other research groups are invited to be interested in this unknown green material.

Keywords: Bamboo, *Pseudosasa amabilis*, Design-driven innovation, Life-cycle assessment, Circular economy, Ecodesign, CAD/CAE tools.

INTRODUCCIÓN

Los bambúes (bambusoideae) son plantas angiospermas perennes, familia herbácea de las poáceas (Liese 1998). Estas plantas crecen de forma nativa en todos los continentes excepto en Europa y la Antártida (Peña *et al.* 2015), existiendo más de 1250 especies en todo el mundo, aunque menos de 100 especies tienen propiedades para su uso estructural (Trujillo y López 2020). Entre ellas destacan las siguientes especies: Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) (América del Sur), Moso (*Phyllostachys edulis*) (China) y el bambú Gigante (*Dendrocalamus asper*). La distribución geográfica natural del bambú se concentra en la franja tropical, subtropical, y templada, desde el nivel del mar hasta los 4300 msnm (Peña *et al.* 2015). Su rápida tasa de crecimiento significa que potencialmente pueden actuar como sumideros de carbono muy efectivos, especialmente si se utiliza una extracción selectiva regular (Kuehl y Yiping 2012). En concreto, según Xu *et al.* (2022a) el potencial de almacenamiento de carbono de una tonelada de bambú es alrededor de 140 kg mayor que la misma cantidad de madera.

El bambú como material para el diseño, fabricación y construcción

Tradicionalmente el bambú ha formado parte de diferentes culturas con distintos usos, en las que se ha empleado desde material de construcción hasta material para productos de artesanía, muebles, pulpa, papel (Kaur 2018). En este contexto, la fase de selección del bambú ha sido convencionalmente empírica, siendo el “color” una de las principales características que han tomado como referencia los productores, para saber el momento en que se pueden comercializar los culmos, es por ello, que se debería avanzar hacia una estandarización de las distintas edades del bambú mediante colorimetría (Hernández-López *et al.* 2021). Cuando los culmos de bambú se utilizan para productos duraderos, como viviendas, pueden actuar como materiales muy sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, secuestrando del orden de 5 toneladas de carbono por hectárea al año (Song *et al.* 2011). La propia naturaleza del bambú, su morfología cilíndrica con acumulación de fibras en la cara externa y su alto grado de elasticidad, lo convierten en un material especialmente apto para construcciones sísmo resistentes (Kaminski *et al.* 2016a). El bambú en su hábitat natural trabaja como una viga en voladizo con un apoyo fijo en la tierra, sujeto a su propio peso y a la carga del viento, por lo tanto, tiene una naturaleza estructural optimizada para resistir momentos flectores (Tan *et al.* 2011). Así mismo, la resistencia a la tracción del bambú es ideal para reemplazar al acero incluso en aplicaciones de carga (Van der Lugt *et al.* 2006, Van Dam *et al.* 2018).

La Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) junto con el bambú Moso (*Phyllostachys edulis*) y el bambú Gigante (*Dendrocalamus asper*) son las variedades de bambú con mejor comportamiento estructural (Escamilla y

Habert 2014), si bien, de cara a la fabricación de una estructura es muy importante en el proceso de diseño tener en cuenta que se trata de un material anisotrópico (Takeuchi 2004). Por otro lado, el bambú también se emplea de forma laminar, en paneles, esterillas, etc. (Mora-Rodríguez *et al.* 2008, Xiao *et al.* 2013, Nguegang-Nkeuwa *et al.* 2022), y en dimensiones más pequeñas para la producción de tableros aglomerados (José y Beraldo 2010), e incluso en combinación con otros materiales como el pino y el mate (Rush *et al.* 2023) o residuos de caña de azúcar (Brito *et al.* 2022), entre otros. Por todo ello, el bambú es un recurso natural, que no se debe pasar por alto para frenar el cambio climático (Yadav y Mathur 2021). Asimismo, se ha demostrado que el bambú es más sostenible que el acero, el hormigón y la madera en general (Van der Lugt *et al.* 2003, Van der Lugt *et al.* 2006), incluso en los casos en los que se vende a países de Europa occidental. Por otro lado, en un estudio realizado por Amada y Untao (2001), en el que compararon los valores de tenacidad a la fractura del bambú con otros tipos de maderas y metales, el valor promedio obtenido para el bambú fue de $56,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, siendo más alto que el de la aleación de aluminio, el abeto Douglas o la Picea (abeto rojo).

Las características del bambú como material estructural han sido estudiadas por multitud de investigadores de todo el mundo, se pueden mencionar algunos de los estudios y manuales que se utilizan como referencia, como son los de Zhou (1981), Hidalgo-López (1981), Amada *et al.* (1996), Luna *et al.* (2014) y Zaragoza-Hernández *et al.* (2015). Actualmente, se trata de una línea de trabajo en constante crecimiento, tal y como se puede observar en la Figura 1, que hace referencia a una búsqueda realizada en las bases de datos “Web of Science (WoS)” y “Scopus”, la cual fue acotada para los artículos publicados en los primeros 20 años del siglo XXI (período 2000-2020), utilizando para ello el siguiente patrón de búsqueda: (“bamboo*”) AND (“material*” OR “structural material*” OR “construction material*” OR “building material*” OR “manufacturing material*” OR “production material*” OR “construction equipment*” OR “design material*”). En síntesis, se identifica una clara tendencia ascendente en el número de publicaciones científicas, con más de 6000 artículos publicados e indexados en WoS hasta el año 2020.

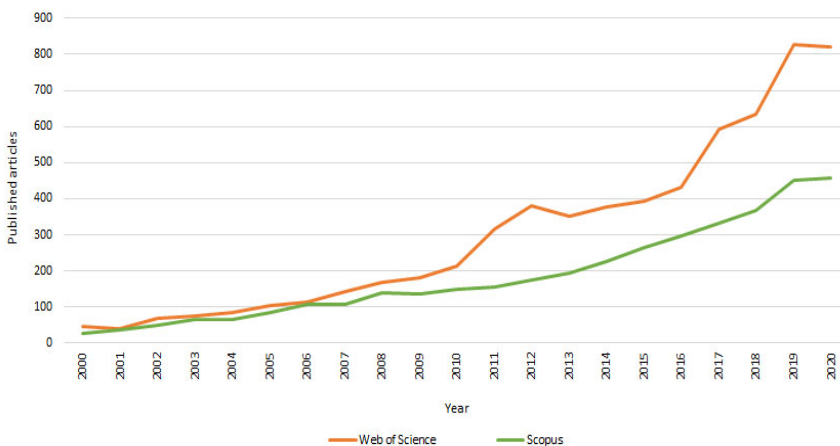


Figura 1: Tendencia en las publicaciones científicas referentes al bambú como material estructural, tomando como referencia las bases de datos Web of Science (todas las colecciones) y Scopus desde el año 2000 hasta el 2020.

Aunque en las últimas décadas el estudio del bambú como material estructural está despertando el interés entre la comunidad científico-técnica, uno de los principales obstáculos de este trabajo, ha sido la ausencia de investigaciones previas (literatura científica) en las que se estudie y analice estructuralmente el bambú Tonkin (*Pseudosasa amabilis*). En este contexto, se ha realizado una búsqueda bibliográfica más específica en las bases de datos anteriores, apareciendo sólo 5 artículos referentes al bambú Tonkin como material estructural (5 en WoS y 4 en Scopus), estando 4 de ellos indexados en ambas bases de datos. En la Tabla 1 se recoge una recopilación de los estudios analizados.

Tabla 1: Estudios publicados hasta el año 2020 sobre la variedad de bambú Tonkin como material.

Título	Autores
Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls	Moroz <i>et al.</i> 2014
Dynamic variation of fuel properties of tonkin cane (<i>Pseudosasa amabilis</i>) during maturation	Cheng <i>et al.</i> 2015
Bamboo bicycle - Past or future?	Penava <i>et al.</i> 2016
The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for bicycles	Jakovljević <i>et al.</i> 2017
Internode morphometrics and allometry of tonkin cane <i>Pseudosasa amabilis</i>	Cheng <i>et al.</i> 2017

En estos 5 trabajos previos (Tabla 1) se recoge información específica sobre el bambú Tonkin, pudiéndose clasificar según las características de la caña y usos. Atendiendo a sus características, en uno de los estudios se comprobó que la capacidad calorífica de la caña aumenta en proporción con su madurez, obteniendo valores más altos que algunas maderas leñosas (Cheng *et al.* 2015). Por otro lado, Cheng *et al.* (2017) estudiaron la morfología y alometría del bambú Tonkin, recopilando sus valores característicos en función de diferentes parámetros. Asimismo, en otro estudio se observó la variación de sus propiedades mecánicas en función del grado de humedad (Jakovljević *et al.* 2017). Respecto a sus usos, se obtuvieron valores muy favorables en comparación a otros materiales empleados en la fabricación de cuadros de bicicleta (Penava *et al.* 2016), lo cual abre la posibilidad para su empleo como una alternativa sostenible. En último lugar, en zonas donde predomina, el bambú Tonkin puede ser una alternativa a los muros reforzados con acero en viviendas de bajo coste (Moroz *et al.* 2014).

Este trabajo pretende contribuir a avanzar en el vacío existente en la literatura científica en torno al bambú Tonkin como material, para ello se busca explorar como estrategia de Ecodiseño su utilización de cara a analizar y valorar si mejora el ciclo de vida, con relación a los diseños de estructuras livianas (e.g., un puesto de mercado) que se comercializan actualmente en acero. En ese sentido, tal y como apunta González-Yebra (2014), descubrir y trabajar la versatilidad del bambú puede convertirlo en un óptimo recurso, que ofrezca nuevas oportunidades de obtener ingresos en actividades industrialmente sostenibles. Hay que tener en cuenta que, a día de hoy, la producción mundial del acero (WSP) no ha parado de crecer debido a su gran demanda, hasta el punto de que se puede llegar a considerar como un indicador mensual de la actividad económica mundial real (Ravazzolo y Vespignani 2020). Teniendo en cuenta dicho escenario, en el presente estudio se han planteado los siguientes objetivos específicos: i) Explorar las posibilidades del bambú como material estructural y estrategia de Ecodiseño. ii) Realizar un rediseño de una estructura de puesto de mercado para frutas y verduras con bambú mediante herramientas CAD-CAE para posteriormente, comprobar el comportamiento mecánico del bambú Tonkin (*Pseudosasa amabilis*) mediante un estudio de elementos finitos (AEF). iii) Desarrollar un Análisis del Ciclo Vida (ACV) comparando el diseño comercial (acero galvanizado) con el rediseño propuesto en bambú, donde el ACV se acota a los 4 indicadores principales que miden el impacto ambiental: huella de carbono, consumo de energía, acidificación del aire y eutrofización.

Materiales y métodos

La metodología seguida ha sido D4S (“Design for Sustainability”) desarrollada por la universidad holandesa Delft University of Technology. Se basa en observar el ciclo de vida de un producto, incluyendo la extracción, el procesamiento y el suministro de las materias primas y la energía requerida para su desarrollo. Los factores claves son el consumo de materiales de entrada (agua, energía en cada una de las etapas del ciclo de vida) y la producción de materiales de salida (agua, calor, emisiones y desechos) (Crul y Diehl 2007). Este enfoque de Eco-Rediseño está cada vez más interiorizado en la ingeniería del diseño (Brezet y Silvester 2004). En el caso de este trabajo, se siguió con un enfoque similar al desarrollado por Pérez-Ortega *et al.* (2021), es decir incluye en un mismo flujo de trabajo “herramientas CAD-CAE” y “estrategias de Ecodiseño”, proponiendo la incorporación de un material con menos impacto medioambiental (i.e., el bambú Tonkin).

Para el proceso de diseño y modelado en 3D el software elegido ha sido SolidWorks® (2018), dado que

ofrece un gran surtido de complementos y módulos CAD-CAE. Entre ellos, en este estudio se ha trabajado con “SW Simulation” y “SW Sustainability”. El módulo Simulation permite realizar un AEF para evaluar la resistencia mecánico-estructural del bambú Tonkin. En dicho módulo se tienen en cuenta: material, uniones, conexiones, cargas, tamaño de mallado para el cálculo de la simulación y análisis estático. Los resultados del estudio están calculados con base en el criterio de máxima tensión de Von Mises (Ecuación 1), el cual indica las deformaciones y esfuerzos que se producen en las distintas partes de un material o estructura.

$$\sigma_{vM} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{(1/2)} \quad (1)$$

Donde: σ_1 , σ_2 , y σ_3 son las tensiones principales (MPa).

El paquete SolidWorks® y específicamente el módulo Simulation, se ha utilizado previamente de forma experimental en la industria del mueble (Koç *et al.* 2011), tanto en estudios con maderas como con materiales derivados de éstas, para determinar los esfuerzos a los que estaban sometidos dichos materiales (Gaff y Gašparík 2013, Gaff *et al.* 2015, Gašparík *et al.* 2017). En esta línea, Vratuša *et al.* (2017) apuntan a que SolidWorks® podría ser una herramienta útil para el cálculo de los desplazamientos, deformaciones y tensiones de componentes de madera, reduciendo de esta forma las fases de diseño e indirectamente el tiempo y los costos.

Por otro lado, el módulo Sustainability incorpora la base de datos del ACV del PE International y utiliza un modelo general de procesos que emplea el software de ACV. SW Sustainability se basa en la metodología de CML elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos, utilizada para calcular los factores de impacto, a día de hoy, se considera como una de las más completas (Vinodh *et al.* 2012).

Caso de estudio

Como caso de estudio de investigación aplicada y con carácter exploratorio, se propone la incorporación del análisis de ciclo de vida (vector medioambiental) en el proceso de rediseño CAD de un puesto de mercado para frutas y verduras, siendo la principal estrategia de diseño, el cambio de material de acero a bambú (variedad Tonkin). Hay que tener en cuenta, que la fase de diseño es la de mayor potencial a la hora de minimizar los impactos tanto ambientales como sociales. Como justificación del caso de estudio propuesto se puede mencionar que, en estudios recientes en los que se han llevado a cabo varios paneles de investigación en torno la presencia de la componente “Diseño” en el sector agroalimentario, se apunta a la necesidad de proporcionar nuevos incentivos para el impulso del Diseño (y el Ecodiseño) como un importante factor de innovación no tecnológica en el ámbito de la industria agroalimentaria (González-Yebra *et al.* 2019a, González-Yebra *et al.* 2019b). En la Figura 2 se muestra una composición gráfica con el diseño de detalle en 2D y 3D desarrollado en Solidwork®, para el estudio del comportamiento mecánico y medioambiental del bambú Tonkin en la estructura del puesto de mercado.

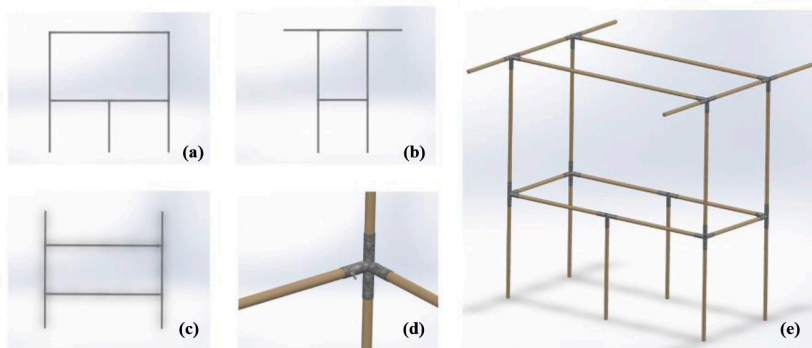


Figura 2: Vistas y detalle estructura final rediseñada en bambú Tonkin. (a) Vista de alzado, (b) Perfil izquierdo, (c) Vista en planta, (d) Detalle de unión tipo conexión mediante tornillo y tuerca de mariposa. (e) Perspectiva 3D del rediseño con cañas de bambú del puesto de mercado.

Aproximación al bambú Tonkin

El bambú Tonkin (*Pseudosasa amabilis*) predomina de forma natural en la zona sur de China (Cheng *et al.* 2017). Esta especie presenta un alto rendimiento como biocombustible con un poder calorífico de 19 MJ/kg, superior incluso a algunas de las maderas leñosas, pudiéndose alcanzar en 1 año de maduración de la caña (Cheng *et al.* 2015). Desde el punto de vista estructural, un grupo de investigación de Croacia determinó experimentalmente algunas propiedades mecánicas en 5 cañas, para la fabricación de bicicletas de bambú (Penava *et al.* 2016, Jakovljević *et al.* 2017). Por otro lado, es importante tener en cuenta, que las características dimensionales del bambú deben ser consideradas en el proceso de caracterización de cualquier especie (Harries *et al.* 2017). Para ello se ha aplicado la norma ISO 19624:2018 (2018), que identifica el diámetro, la pared (espesor) y las propiedades que necesitan ser caracterizadas dentro de un proceso de clasificación, siendo considerado el diámetro como la propiedad más importante a tener en cuenta para caracterizar una especie concreta (Trujillo y Jangra 2016). Por tanto, para conocer una especie determinada es de vital importancia identificar los diámetros típicos y espesores de pared.

Dada la escasez de información disponible sobre el bambú Tonkin, se llevó a cabo junto a Bambusa Estudio (empresa española de distribución de bambú), un muestreo aleatorio para un diámetro exterior de bambú Tonkin de 30 mm aproximadamente, mismo diámetro que la estructura que se comercializa en la actualidad en acero. Actualmente, hay disponibles cañas de bambú Tonkin con diámetros de 20, 30 y 40 mm. En la Tabla 2 se detallan los datos y parámetros obtenidos (μ , M_o) de las muestras analizadas en este estudio de 30 mm de diámetro. Para el diseño y simulación de la estructura se ha considerado la moda como parámetro más representativo, es decir, un diámetro exterior de 30 mm y un espesor 6 mm (Figura 3).

Tabla 2: Resultados del muestreo de las cañas de bambú Tonkin de calibre 30 mm.

Caña de bambú Tonkin	Ø Ext (mm)	Espesor de pared (mm)
1	30	7
2	32	6
3	30	6
4	30	6
5	30	8
6	30	6
7	30	7
8	32	6
9	30	6
10	31	5
Media (μ)	30,5	6,3
Moda (M_o)	30	6

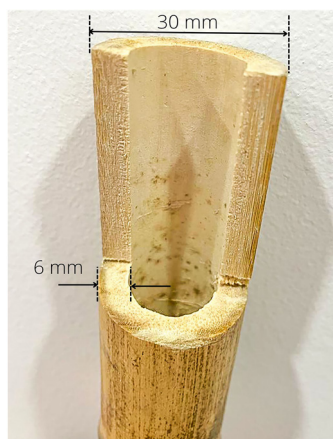


Figura 3: Ejemplo físico de una caña de bambú Tonkin de 30 mm de diámetro, propuesta para el rediseño del puesto de mercado.

En la Tabla 3 se muestran los datos referentes a la geometría de la caña, así como las propiedades mecánicas consideradas en el diseño y simulación de la estructura de bambú Tonkin, si bien, dada la limitación de datos y carencia de estudios técnicos sobre esta variedad, se han utilizado valores medios de las especies de bambú con uso estructural (Kaminski *et al.* 2016b, Ghavami y Moreia 1996), con el propósito de llevar a cabo la simulación y ACV del Tonkin. Es importante comentar, que el bambú como material no está incluido dentro de la biblioteca de materiales de SolidWorks® (2018), por tanto, en este caso se creó y definió el material, incorporando las propiedades mecánicas que lo caracterizan (i.e., Módulo Elástico, Coeficiente de Poisson, Densidad y Límite elástico a flexión). Si se utilizase otro tipo de bambú este procedimiento se debería reformular, dado que cada especie tiene unas características diferentes.

Tabla 3: Datos geométricos y mecánicos utilizados para el modelado del material (caña de bambú Tonkin) en SolidWorks®.

Parámetros	Datos	Fuente
Diámetro caña tonkin	30 mm	Tabla 2
Espesor caña tonkin	6 mm	Tabla 2
Módulo elástico	13500 MPa	Kaminski <i>et al.</i> 2016b
Coeficiente de Poisson	0,22	Ghavami y Moreia 1996
Densidad (Humedad 12 %)	650 kg/m ³	Kaminski <i>et al.</i> 2016b
Límite elástico (Flexión)	30 MPa	Kaminski <i>et al.</i> 2016b

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características técnico-mecánicas (Análisis de elementos finitos)

Tras el análisis y simulación realizado con SolidWorks® (2018), cabe destacar un mejor comportamiento de la estructura diseñada en bambú Tonkin, frente a los valores obtenidos de la estructura comercial en acero. El bambú se comporta mejor que el acero tanto en el análisis tensional como en el de deformaciones (Figura 4). En la Tabla 4, se puede comprobar que en el análisis tensional, el acero está bajo unas cargas que suponen un 95 % de la tensión máxima admisible, mientras que el bambú está sometido bajo las mismas cargas a un 71 % (respecto a la tensión máxima admisible). Por otro lado, los valores de deformaciones en la estructura de acero son más de 3,5 veces superiores que en la estructura de bambú (Tabla 4). Por último, se puede afirmar que la estructura propuesta en bambú Tonkin resiste los esfuerzos a los que está sometidos, ya que se cumple la Ecuación 2.

$$\sigma \leq \sigma_{M\acute{a}x} \quad (2)$$

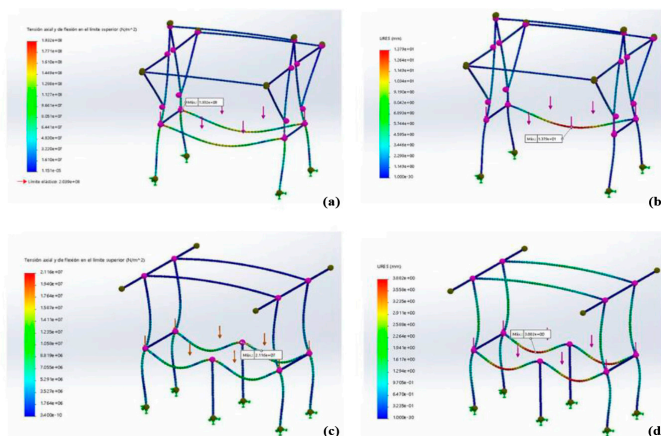


Figura 4: Simulación mecánica en SolidWorks®. Diagramas de tensiones de la estructura original en acero (a) y de la estructura propuesta en bambú Tonkin (c). Diagramas de deformaciones de la estructura en acero (b) y de la estructura en Tonkin (d).

Tabla 4: Resultados del análisis de elementos finitos, comparativa mecánica entre la estructura de acero y la propuesta en bambú Tonkin.

MATERIAL	T (N/m ²)	C E-3	T máx. (N/m ²)	% T	D (m)	D (mm)
Acero	1,932 x 10 ⁸	SI	2,039 x 10 ⁸	95 %	1,379 x 10 ⁻²	13,79
Bambú	2,116 x 10 ⁷	SI	3 x 10 ⁷	71 %	3,882 x 10 ⁻³	3,88

Donde: T = Tensiones, C E-3= Cumple Ecuación 2 ($\sigma \leq \text{máx.}$), T máx. = Tensión máxima, % T = Porcentaje tensión respecto a la tensión máxima, D = Deformaciones.

Impacto medioambiental y circularidad (Análisis del ciclo de vida)

La gran ventaja que se puede observar entre ambos materiales (acero y bambú), tal y como se puede observar en la Tabla 5, es que el bambú es una materia prima que no necesita ningún proceso de transformación de gran impacto para su empleo estructural. En cambio, el acero conformado en forma tubular requiere de un proceso de extrusión, el cual tiene un consumo elevado de electricidad y gas natural.

Por otro lado, la estructura de bambú es casi 6 veces más ligera que la estructura de acero, factor importante a tener en cuenta en la fase de montaje y desmontaje de dicha estructura. Atendiendo al análisis de ciclo de vida de un producto (ACV), se establecen 4 indicadores clave para la evaluación del impacto medioambiental: i) Huella de carbono; ii) Energía total consumida; iii) Acidificación atmosférica y iv) Eutrofización del agua.

Huella de carbono

El bambú genera poco dióxido de carbono y otros gases relacionados con la combustión de combustibles. Es así un recurso en el que su impacto es mínimo en comparación con el acero. La huella de carbono es por tanto un indicador para medir el impacto global como el potencial de calentamiento global (GWP). Este factor podría estar ligado a problemas medioambientales como la desaparición de glaciares, extinción de especies y la aparición del cambio climático. Como se recoge en la Tabla 6, el valor obtenido del bambú es aproximadamente 16 veces inferior en cuanto al nivel de dióxido de carbono generado en la fase del ciclo de vida. En el acero tiene un valor de 123 kgCO₂e (kilogramos de dióxido de carbono por metro cuadrado), mientras que en el bambú un 8,06 kgCO₂e.

Energía total consumida

La energía total consumida tiene en cuenta la electricidad, combustible y energía utilizada para obtener y procesar dichos combustibles, utilizados durante el ciclo de vida de un producto. Esa energía se expresa como el valor del poder calorífico neto de la demanda de energía. Se puede observar en la Tabla 6, que el valor la energía empleada en el ciclo de vida del acero es 58 veces superior al del bambú, es decir, 1680 MJ y 29 MJ respectivamente.

Acidificación atmosférica

El dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno incrementan la acidez del agua de lluvia, ésta hace que la tierra y el agua se acidifique, afectando tóxicamente sobre la flora y fauna acuática. Como se puede comprobar en la Tabla 6, se obtiene un valor del acero 14 veces superior al del bambú, en concreto 0,473 kgCO₂e en el ciclo de vida del acero y de 0,0326 kgCO₂e para el bambú.

Eutrofización del agua

El nitrógeno y el fosfato de aguas residuales generan algas que agotan el oxígeno del agua, destruyendo la flora y fauna. Aquí la diferencia entre ambas es menor, tal y como se puede observar en la Tabla 6, aunque el indicador del acero sigue siendo más elevado que el del bambú, unas 1,4 veces superior. Obteniendo un valor de 0,0108 kgPO₄e en el acero y 0,0077 kgPO₄e en el bambú.

En síntesis, todos los indicadores estudiados en este trabajo son mucho más favorables en el ciclo de vida del bambú Tonkin, además presenta la ventaja de poseer una alta capacidad de captación y secuestro del carbono atmosférico. Esta característica lo hace un recurso a tener en cuenta para reducir el impacto del cambio climático (Yiping *et al.* 2010), dado que como se ha analizado en este estudio, el impacto ambiental

de la utilización del bambú Tonkin como recurso estructural es mínimo. Dado que las fases de su proceso de tratamiento requieren de muy poca energía, estando entre dichas fases el corte, la preservación y la limpieza mediante hidrolimpiadora. Si bien, queda evidenciado que el mayor impacto corresponde al transporte (Xu et al. 2022b). Por todo ello, mediante la utilización del bambú, se podría lograr la sustitución de materiales intensivos en emisiones como, por ejemplo, el acero, el cemento y el PVC, en una amplia gama de productos de larga duración (Borowski et al. 2022).

Por último, dentro de los objetivos del presente trabajo, se encuentra una relación directa con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). La Organización Internacional del Bambú y Ratán (INBAR) trabaja con los países para enfocar el uso del bambú y ratán como recurso estratégico, apoyando el desarrollo sostenible y planes de acción de economía verde. En su estrategia y desempeño contribuyen directamente a siete ODS relacionados con el bambú: i) Acabar con la pobreza en todas sus formas; ii) Proporcionar servicios de energía modernos; asequibles, sostenibles y confiables para todos; iii) Acceso a una vivienda adecuada y asequible; iv) Uso eficiente de los recursos naturales; v) Abordar el cambio climático; vi) Proteger y restaurar los ecosistemas terrestres; vii) Revitalizar la asociación mundial para el desarrollo sostenible.

Tabla 5: Comparación del impacto medioambiental entre la estructura de acero y la de bambú Tonkin.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL		ACERO GALVANIZADO	BAMBÚ TONKIN
Contenido reciclado		12 %	0 %
Peso		40,3 kg	6,8 kg
Proceso de fabricación		Extrusión	Ninguno
Área de superficie		6,84 m ²	3,50 m ²
Duración		10 años	10 años
Fabricación	Región	Asia	Asia
	Proceso	Extrusión	Ninguno
	Consumo de electricidad	0,142 kWh	0 kWh
	Consumo de gas natural	1,16 x 10 ⁶ J	0 J
	Tasa de desecho	5,5 %	0
Utilización	Región	Europa	Europa
	Tiempo	10 años	10 años
Transporte	Barco	1,6 x 10 ⁴ km	1,6 x 10 ⁴ km

Tabla 6: Valores impacto medioambiental según la huella de carbono, la energía total consumida, la acidificación atmosférica y la eutrofización del agua en el ciclo de vida del acero galvanizado y del bambú Tonkin.

		Material	Fabricación	Transporte	Fin de la vida útil	Totales
HC (kgCO ₂ e)	Acero	87	8,4	1,6	36	123
	Tonkin	2,5	0	0,246	5,1	8,06
ETC (MJ)	Acero	1200	120	20	340	1680
	Tonkin	29	0	3,1	2,9	29
AA (kgSO ₂ e)	Acero	0,221	0,037	0,052	0,163	0,473
	Tonkin	0,023	0	8,1 x 10 ⁻³	1,5 x 10 ⁻³	0,0326
EA (kgPO ₄ e)	Acero	2,1 x 10 ⁻³	1,8 x 10 ⁻³	4,9 x 10 ⁻³	2 x 10 ⁻³	0,0108
	Tonkin	2,9 x 10 ⁻³	0	7,7 x 10 ⁻⁴	4,1 x 10 ⁻³	0,0077

Donde: AHC = Huella de carbono, ETC = Energía total consumida, AA = Acidificación atmosférica, EA = Eutrofización del agua.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de carácter exploratorio se ha realizado con el propósito de dar a conocer el Tonkin, una variedad de bambú prácticamente desconocida, como un primer avance para visibilizarlo como una alternativa para su uso como material estructural, con unas excelentes cualidades/características mecánicas comparables al acero tubular, así como un evidente menor impacto medioambiental, ya que se trata de un recurso natural con poco gasto energético. En síntesis, para el caso de estudio planteado, los cuatro indicadores clave de la medición de la sostenibilidad son muy elevados en la estructura comercial de acero, en comparación con la estructura de bambú Tonkin. Es importante reseñar, que el desarrollador de software Dassault Systèmes hasta la fecha no incluye en SolidWorks® (2018) el bambú como material, por la dificultad que supone que existan tantas especies distintas para uso estructural (cerca de 100 especies), en este contexto, los datos y hallazgos obtenidos en este estudio pueden servir de referencia para otros investigadores, ingenieros y proyectistas. Como valoración final, se ha podido comprobar que el bambú Tonkin, es un material que ha sido escasamente estudiado, si bien se trata de una alternativa verde con un importante potencial, por lo que se invita a otros grupos de investigación a que se interesen sobre este material, como una oportunidad para muchos sectores económicos. En ese sentido, se abre aquí el debate para un posible reemplazo del acero, así como de otros metales predominantes y maderas tradicionales, por ende, este trabajo puede servir como punto de partida para emprender nuevas líneas de investigación:

- Caracterizar mecánicamente el bambú Tonkin para su uso como material estructural con base en la norma ISO 22157:2019 (2019), mediante la realización de diferentes ensayos de laboratorio (tracción paralela a las fibras, compresión paralela a las fibras, flexión y corte longitudinal) sobre una muestra mínima de 12 cañas. Así como, determinar una serie de parámetros que son desconocidos hasta la fecha (módulo elástico, coeficiente de Poisson, densidad y límite elástico).
- Diseñar y desarrollar una nueva unión más sostenible que sea desmontable para unir cañas de bambú Tonkin.
- Estudiar la viabilidad del cultivo (caracterización agronómica) del bambú Tonkin en Europa occidental, como incentivo y desarrollo socioeconómico de zonas en riesgo de despoblación (e.g., España vaciada).
- Evaluar y comparar desde la perspectiva de la economía circular, qué beneficios podría suponer la fabricación de estructuras livianas (similares a la del caso de estudio) en bambú Tonkin, en lugar del tradicional acero galvanizado.
- Estudiar el impacto ambiental de diferentes alternativas de recubrimientos para el bambú de cara a garantizar su durabilidad en el tiempo

Por lo tanto, es necesario realizar más investigaciones para avanzar en las líneas propuestas y en otras, que permitan conocer las posibilidades reales de este material desconocido, el bambú Tonkin.

Contribuciones de autoría

Ó. G-Y.: Conceptualización; Investigación; Metodología; Análisis Formal; Escritura - borrador original. A. L-R.: Investigación; Curación de datos; Análisis Formal; Escritura: revisión y edición. A. T-B.: Supervisión; Recursos; Adquisición de fondos; Escritura: revisión y edición. C. P. T.: Supervisión; Validación; Redacción - revisión y edición.

Agradecimientos

A la Junta de Andalucía por el Contrato Postdoctoral (Ref, DOC_01126) del primer autor, período durante el que realizó una estancia en el “Instituto Universitario de Ciencias Ambientales (IUCA)” de la Universidad Complutense de Madrid, de la que es fruto este trabajo. También se agradece el apoyo recibido por parte del grupo “Análisis, Diseño y Materiales, GIES” de la Universidad Nacional de Colombia, de la “Asociación Ibérica del Bambú (AsIB)” y la empresa “Bambusa Estudio”, en especial a Isaac González, Eugenia Muscio y Pierre Boucher por su colaboración y asesoramiento técnico.

REFERENCIAS

- Amada, S.; Munekata, T.; Nagase, Y.; Ichikawa, Y.; Kirigai, A.; Zhifei, Y. 1996.** The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials. *Journal of Composite Materials* 30(7): 800-819. <https://doi.org/10.1177/002199839603000703>
- Amada, S.; Untao, S. 2001.** Fracture properties of bamboo. *Composites Part B: Engineering* 32(5): 451-459. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00022-1)
- Borowski, P.F.; Patuk, I.; Bandala, E.R. 2022.** Innovative Industrial Use of Bamboo as Key “Green” Material. *Sustainability* 14(4): 1955. <https://doi.org/10.3390/su14041955>
- Brezet, H.; Silvester, S. 2004.** Design for sustainability (D4S): Towards advanced product concepts. *Environmental Engineering and Management Journal* 3(4): 591-602. <https://n9.cl/5waeqt>
- Brito, F.M.S.; Bortoletto-Júnior, G.; Paes, J.B. 2022.** Wettability and decay of particleboards manufactured with thermally treated sugarcane residue and bamboo (*Dendrocalamus asper*) particles. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 24(30):1-18. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100430>
- Cheng, L.; Adhikari, S.; Wang, Z.; Ding, Y. 2015.** Dynamic variation of fuel properties of Tonkin Cane (*Pseudosasa amabilis*) during maturation. *Energy Fuels* 29(4):2408-2415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00385>
- Cheng, L.; Hui, C.; Reddy, G.V.; Ding, Y.L.; Shi, P.J. 2017.** Internode morphometrics and allometry of Tonkin Cane *Pseudosasa amabilis*. *Ecology and Evolution* 7(22): 9651-9660. <https://doi.org/10.1002/ece3.3483>
- Crul, M.R.M.; Diehl, J.C. 2007.** Diseño para la sostenibilidad: un enfoque práctico para economías en vías de desarrollo. United Nations Environment Programme (UNEP): Paris, Francia.
- Escamilla, E.Z.; Habert, G. 2014.** Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity. *Journal of Cleaner Production* 69: 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.067>
- Gaff, M.; Gašparík, M. 2013.** The development of stresses during the shaping of the surface of aspen wood and their impact on the quality of the surface. *BioResources* 8(3): 3741-3752. <https://n9.cl/pyujf>
- Gaff, M.; Gašparík, M.; Borůvka, V.; Haviarová, E. 2015.** Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Materials & Design* 87(15): 1065-1071. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>
- Gašparík, M.; Gaff, M.; Babiak, M. 2017.** Tension stress simulations of layered wood using a finite element method. *Wood Research* 62(4), 517-528. <https://n9.cl/8kc8o>
- Ghavami, K.; Moreia, L.E. 1996.** Development of a new joint for bamboo space structures. *WIT Transactions on The Built Environment* 21: 201-210. <https://n9.cl/cklmi>
- González-Yebra, Ó. 2014.** *Caracterización del bambú Guadua (Guadua Angustifolia) para el diseño e industrialización en España.* vol. 94. Universidad de Almería: Almería, España. ISBN: 978-84-16027-12-5
- González-Yebra, Ó.; Aguilar, M.A.; Aguilar, F.J. 2019a.** A first approach to the Design Component in the agri-food industry of southern Spain. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias* 51(1): 125-146. <https://n9.cl/qc416>
- González-Yebra, Ó.; Aguilar, M.A.; Aguilar, F.J. 2019b.** Is the Design a Vector to be Considered in the Agri-food Industry? An Interprofessional Analysis in Andalusia (Spain). In: *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II.* Cavas-Martínez, F.; Eynard, B.; Fernández-Cañavate, F.; Fernández-Pacheco, D.; Morer, P.; Nigrelli, V. (Eds.). Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_59

Harries, K.A.; Bumstead, J.; Richard, M.; Trujillo, D. 2017. Geometric and material effects on bamboo buckling behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 170(4): 236-249. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00018>

Hernández-López, S.; Ávalos-Vargas, A.; Zamudio-Sánchez, F.J.; Orozco-Gutiérrez, G.; Borja-de la Rosa, A.M. 2021. Colorimetría de los tallos del bambú (*Guadua angustifolia*) en tres estados de madurez. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 23(8): 1-10. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100408>

Hidalgo-López, O. 1981. Manual de construcción con bambú. Estudios Técnicos Colombianos LT-DA-Editores. Universidad Nacional de Colombia. Centro de investigación de Bambú y Madera (CI-BAM).

ISO. 2018. Bamboo structures -Grading of bamboo culms - Basic principles and procedures. ISO 19624:2018. ISO: Ginebra, Suiza.

ISO. 2019. Bamboo structures - Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms - Test methods. ISO 22157:2019. ISO: Ginebra, Suiza.

Jakovljević, S.; Lisjak, D.; Alar, Ž.; Penava, F. 2017. The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for bicycles. *Construction and Building Materials* 150: 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.189>

José, F.J.; Beraldo, A.L. 2010. Tableros de partículas de bambú (*Bambusa vulgaris* Schrad) y resina poliuretana a base de aceite de ricino (*Ricinus communis* L.). *Ambiente Construido* 10(4): 259-266. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400018>

Kaminski, S.; Lawrence, A.; Trujillo, D. 2016a. Structural use of bamboo Part 1: Introduction to bamboo. *The Structural Engineer* 94(8):40-43. <https://n9.cl/19f8p>

Kaminski, S.; Lawrence, A.; Trujillo, D.; Feltham, I.; López, L.F. 2016b. Structural use of Bamboo Part 3: Design values. *The Structural Engineer* 94(12): 42-45. <https://n9.cl/2mcys>

Kaur, P.J. 2018. Bamboo availability and utilization potential as a building material. *Forestry Research and Engineering: International Journal* 2(5): 240-242. <https://doi.org/10.15406/freij.2018.02.00056>

Koç, K.H.; Kizilkaya, K.; Erdinler, E.S.; Korkut, D.S. 2011. The use of finite element method in the furniture industry. *African Journal of Business Management* 5(3): 855-865. <https://doi.org/10.5897/AJBM10.551>

Kuehl, Y.; Yiping, L. 2012. Carbon Off-Setting with Bamboo. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), Working Paper n°. 71, Beijing, China.

Liese, W. 1998. The anatomy of bamboo culms. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), Technical report n°. 18, Beijing, China.

Luna, P.; Lozano, J.; Takeuchi, C. 2014. Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 16(1): 77-92. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000007>

Mora-Rodríguez, L.; Hernández-González, J.R.; Martirena-Hernández, J.F.; Ariel-Jiménez, S. 2008. El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica. *Revista Ingeniería de Construcción* 23(3): 179-186. <https://n9.cl/1q01g>

Moroz, J.G.; Lissel, S.L.; Hagel, M.D. 2014. Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls. *Construction and Building Materials* 61: 125-137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.006>

Nguegang-Nkeuwa, W.; Zhang, J.; Semple, K.E.; Chen, M.; Xia, Y.; Dai, C. 2022. Bamboo-based composites: A review on fundamentals and processes of bamboo bonding. *Composites Part B: Engineering* 235: 109776. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109776>

- Penava, F.; Jakovljević, S.; Alar, Ž. 2016.** Bamboo bicycle-past or future?. *Indecs* 14(1): 70-79. <https://doi.org/10.7906/indecs.14.1.7>
- Peña, C.; Cabrera, A.; Emilia, M.; Castro, A.; Michelena, E.; Rúgolo de Agrasar, Z.; Soria, P.; Zagare, V. 2015.** *Solución Bambú: Guía para el manejo sustentable del Género Phyllostachys*. Editorial Tigre: Buenos Aires, Argentina.
- Pérez-Ortega, S.; González-Yebra, Ó.; Oliva, R.M.; Álvarez, A.J. 2021.** Theoretical study for redesign of an agricultural package applying ecodesign strategies and CAD/CAE tools. *Dyna* 96(4): 435-440. <https://doi.org/10.6036/9979>
- Ravazzolo, F.; Vespignani, J. 2020.** World steel production: A new monthly indicator of global real economic activity. *Canadian Journal of Economics* 53(2): 743-766. <https://doi.org/10.1111/caje.12442>
- Rush, F.; Hilling, E.; Chagas-Mustefaga, E.; Trevisan, R.; Prata, J.G.; De Magalhães-Miranda, G. 2023** Particleboard experimental production with bamboo, pine and mate for one product of new applications. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 25(14): 1-12. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100414>
- SolidWorks®. 2018.** Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Waltham, Massachusetts, EE. UU.
- Song, X.; Zhou, G.; Jiang, H.; Yu, S.; Fu, J.; Li, W.; Wang, W.; Ma, Z.; Peng, C. 2011.** Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological benefits: assessment of potential, problems, and future challenges. *Environmental Reviews* 19: 418-428. <https://doi.org/10.1139/a11-015>
- Takeuchi, C.P. 2004.** Comportamiento estructural de la guadua angustifolia. Uniones en guadua. *Ingeniería e Investigación* 24(2): 3-7. <https://n9.cl/pkczx>
- Tan, T.; Rahbar, N.; Allameh, S.M.; Kwofie, S.; Dissmore, D.; Ghavami, K.; Soboyejo, W.O. 2011.** Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia* 7(10): 3796-3803. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>
- Trujillo, D.; Jangra, S. 2016.** *Grading of Bamboo*. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), Working Paper n°. 79, Beijing, China. <https://n9.cl/1yetq>
- Trujillo, D.J.; López, L.F. 2020.** Bamboo material characterisation. In *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Harries, K.A., Sharma, B. (Eds.). Woodhead Publishing: Sawston. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00018-4>
- Van Dam, J.E.G.; Elbersen, H.W.; Daza-Montaña, C.M. 2018.** Bamboo production for industrial utilization. *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts*. p.175-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812900-5.00006-0>
- Van der Lugt, P.; Van den Dobbelen, A.A.J.F.; Abrahams, R. 2003.** Bamboo as a building material alternative for Western Europe? A study of the environmental performance, costs and bottlenecks of the use of bamboo (products) in Western Europe. *Journal of Bamboo and Rattan* 2(3): 205-223. <https://n9.cl/h3wti>
- Van der Lugt, P.; Van den Dobbelen, A.A.J.F.; Janssen, J.J.A. 2006.** An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Materials* 20(9): 648-656. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.023>
- Vinodh, S.; Jayakrishna, K.; Alegria, D. 2012.** Environmental impact assessment of an automotive component using eco-indicator and CML methodologies. *Clean Technologies and Environmental* 14(2): 333-344. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0405-x>
- Vratuša, S.; Kariž, M.; Ayrilmis, N.; Kuzman, M.K. 2017.** Finite element simulations of the loading and deformation of plywood seat shells. *European Journal of Wood and Wood Products* 75: 729-738. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1160-4>

Xiao, Y.; Yang, R.Z.; Shan, B. 2013. Production, environmental impact and mechanical properties of glubam. *Construction and Building Materials* 44: 765-773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.087>

Xu, X.; Xu, P.; Zhu, J.; Li, H.; Xiong, Z. 2022a. Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO₂ emissions. *Science of The Total Environment* 814(25): 152697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>

Xu, P.; Zhu, J.; Li, H.; Wei, Y.; Xiong, Z.; Xu, X. 2022b. Are bamboo construction materials environmentally friendly? A life cycle environmental impact analysis. *Environmental Impact Assessment Review* 96: 106853. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106853>

Yadav, M.; Mathur, A. 2021. Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview. *Materials Today: Proceedings* 43(5): 2872-2876. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.125>

Yiping, L.; Yanxia, L.; Buckingham, K.; Henley, G.; Guomo, Z. 2010. Bamboo and Climate Change Mitigation. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), Technical report n°. 32, Beijing, China.

Zaragoza-Hernández, I.; Ordóñez-Candelaria, V.R.; Bárcenas-Pazos, G.M.; Borja-de la Rosa, A.M.; Zamudio-Sánchez, F.J. 2015. Propiedades físico-mecánicas de una guadua mexicana (*Guadua aculeata*). *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17(3): 505-516. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000045>

Zhou, F.C. 1981. Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods. *Journal of Nanjing Technological Collegue of Forest Products* 2(32): 1-32. <https://n9.cl/wnlad>