

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



***BAMBÚ COMO MATERIAL
ESTRUCTURAL: GENERALIDADES,
APLICACIONES Y MODELIZACIÓN
DE UNA ESTRUCTURA TIPO.***

TRABAJO FIN DE GRADO

ALUMNO: Samuel Martínez García

TUTOR: Miguel Redón Santafé

Curso Académico: 2014/2015

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2015

Licencia Creative Commons



RESUMEN

BAMBÚ COMO MATERIAL ESTRUCTURAL: GENERALIDADES, APLICACIONES Y MODELIZACIÓN DE UNA ESTRUCTURA TIPO.

Este trabajo trata de exponer y dar a conocer las posibilidades del bambú como material de construcción. Su uso como material de construcción es una ventaja medioambiental ya que estamos sustituyendo acero y hormigón (materiales con un elevado coste energético) por un material renovable y sostenible que es un excelente fijador de carbono atmosférico, ayudando así a mitigar el cambio climático.

El presente trabajo final de grado tiene como objetivo principal establecer la aptitud estructural del material bambú dentro de tipologías constructivas que actualmente se desarrollan en madera estructural. El contenido que se presenta se organiza a partir del estudio de las aptitudes mecánicas del bambú. Se describen los aspectos generales de la construcción en bambú así como implicaciones medioambientales. Se exponen las tipologías estructurales principales a nivel mundial y asimismo, se analizan las intervenciones realizadas a nivel nacional evaluando con especial atención su creciente interés y potencial futuro de utilización.

PALABRAS CLAVE: Bambú, Estructural, Pasarela, Construcción.

AUTOR: Samuel Martínez García.

LOCALIZACIÓN Y FECHA: Valencia, Septiembre de 2015.

TUTOR: Dr. Miguel Redón Santafé.

ABSTRACT

BAMBOO AS A STRUCTURAL MATERIAL. GENERAL ASPECTS, APPLICATIONS AND DESIGN OF A STANDARD STRUCTURE.

This document attempts to explain the possibilities of bamboo as a building material. Its use as a building material is an environmental advantage because we are replacing steel and concrete (materials with high energy costs) for a renewable and sustainable material. Bamboo is an excellent fixative atmospheric carbon, thereby helping to mitigate climate change.

The key objective of the present final degree is setting the structural ability of bamboo within the constructive typologies that nowadays are used in structural wood. The contents of the work are organized, firstly, from the study of the mechanical skills of bamboo. Secondly, general aspects of bamboo construction together with environmental implications are described. The outstanding structural design performed with bamboo worldwide are analysed. Also, bamboo works at national scale are evaluated drawing the attention into its growing interest and future use.

KEY WORDS: Bamboo, Structural, Gangway, Construction.

AUTHOR: Samuel Martínez García.

PLACE AND DATE: Valencia, September of 2015.

TUTOR: Dr. Miguel Redón Santafé.

INDICE

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivos.....	2
2	Revisión del estado del arte.....	4
2.1	Caracteres generales.....	4
2.1.1	Ecología.....	4
2.1.2	Corte y almacenamiento.....	5
2.1.3	Comparativa frente a otros materiales.....	6
2.2	Aplicaciones del bambú.....	7
2.3	Especies más utilizadas.....	9
2.4	Aplicaciones estructurales.....	10
2.4.1	Ámbito de uso.....	10
2.4.2	El bambú como elemento constructivo.....	11
2.5	Propiedades físico-mecánicas.....	12
2.5.1	Peso específico.....	12
2.5.2	Conductividad térmica.....	12
2.5.3	Compresión.....	12
2.5.4	Tracción.....	13
2.5.5	Módulo de elasticidad.....	13
2.5.6	Cortante.....	13
2.6	Uniones.....	15
2.7	Síntesis.....	15
3	Metodología.....	19
3.1	Antecedentes.....	19
3.2	Descripción.....	20
3.3	Materiales.....	21
3.4	Acciones previstas en el cálculo.....	22
3.4.1	Magnitud de las acciones.....	22
3.4.2	Combinaciones de cargas.....	27
3.5	Cálculo de la estructura.....	27
3.6	Dimensionado de las estructuras tipo.....	31
4	Resultados.....	35

4.1	Madera 1.....	35
4.2	Madera 2.....	37
4.3	Bambú 1.....	39
4.4	Bambú 2.....	40
5	Conclusiones.....	42
6	Bibliografía.....	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Kontum Indochine Café, Kon Tum (Vietnam).....	2
Figura 2: Cubierta de la terminal T4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.....	2
Figura 3: Distribución del bambú a nivel global.....	4
Figura 4: Evolución y partes del bambú.....	5
Figura 5: Comparativa de materiales. Resistencia a flexión frente a su módulo de flexión.....	7
Figura 6: Distintos usos del bambú en crudo dependiendo de la madurez a la que se tala.....	8
Figura 7: Cabaña de bambú y hojas de palmera en Mae Taeng (Tailandia).....	10
Figura 8: Andamiaje de bambú en la ciudad de Kowloon, Hong Kong (China).....	11
Figura 9: Unión cónica con esfera, J. Stamm.....	15
Figura 10: Réplica del pabellón de la guadua de la Expo-Hannover 2000.....	17
Figura 11: Puente de bambú sobre el río Serayu en Java, Indonesia.....	17
Figura 12: Paso elevado en la ciudad de Puebla (México).....	18
Figura 13: Diseño de puente de bambú de Jörg Stamm.....	19
Figura 14: El mismo puente ya finalizado.....	19
Figura 15: Geometría tipología 1.....	20
Figura 16: Geometría tipología 2.....	21
Figura 17: Estructuras de Madera y de Bambú con carga permanente.....	24
Figura 18: Momentos y Axiles en estructuras de madera para la combinación 5.....	28
Figura 19: Momentos y Axiles de las estructuras de bambú para la combinación 5.....	29
Figura 20: Selección de barras sometidas a estudio.....	30
Figura 21: Deformación debida a la combinación 5 en tipología 2 bambú.....	34
Figura 22: Axiles en tipología 2 Madera.....	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Géneros y características. <i>Adaptación de American Bamboo Society</i>	9
Tabla 2: Propiedades mecánicas del bambú.....	14
Tabla 3: Propiedades de la madera.....	21
Tabla 4: Propiedades mecánicas de la <i>Guadua angustifolia</i>	22
Tabla 5: Combinaciones de cargas.....	27
Tabla 6: Resultados Madera 1.....	35
Tabla 7: Resultados Madera 2.....	37
Tabla 8: Resultados Bambú 1.....	39
Tabla 9: Resultados Bambú 2.....	40

1 Introducción.

El presente trabajo pretende exponer las principales características del bambú, sus usos y sus competencias en general. Sin embargo, este estudio centra su atención en la aptitud estructural del bambú mediante la aplicación práctica al estudio y análisis de pasarelas en bambú. De este modo, este documento busca profundizar en el conocimiento existente de las técnicas constructivas a través de los usos estructurales del bambú a la vez que vislumbra su mayor utilización, potencial y difusión internacional de acuerdo a las nuevas tendencias y mayor sensibilidad medioambiental de la arquitectura e ingeniería de estructuras.

Este trabajo se estructura en 5 puntos básicos: Introducción, Revisión del Estado del Arte, Metodología, Resultados y Conclusiones. En el primero se intenta contextualizar al lector, de transmitirle el porqué de la realización de este trabajo y generarle interés en este campo.

A continuación, la revisión bibliográfica profundiza en todas las características del material, desde las cualidades de carácter biológico y ecológico hasta las propiedades físico-mecánicas. Este Apartado comienza con un carácter más generalista y se va enfocando cada vez más en el uso estructural del bambú. El Apartado de metodología describe detalladamente el estudio a realizar sobre las pasarelas tipo fundamentándose en las bases teóricas y prácticas del Apartado anterior. Seguidamente, los resultados de cálculo son expuestos en el Apartado 4 de acuerdo a las expresiones y métodos de cálculo previamente analizados y particularizados. Se analiza la viabilidad de las tipologías propuestas estudiando en profundidad las pasarelas peatonales para un dimensionado satisfactorio.

Por último, las conclusiones analizan e interpretan los resultados obtenidos. También se expone la situación actual a nivel mundial y nacional, los colectivos que se interesan por este material y la proyección futura del sector.

1.1 Antecedentes.

La palabra "bambú" fue introducida por Carl von Linné en 1753 en su obra *Species Plantarum*. Es una herbácea como el arroz, el maíz o la caña de azúcar. Pero a diferencia de estas plantas, la lignina de sus tejidos se convierte con el paso del tiempo en una estructura tan dura como la madera, pero más flexible y ligera. Esto hace del bambú un material muy interesante para muchísimos usos, entre ellos el estructural.

El bambú ha sido desde hace siglos una planta muy importante para muchos pueblos del mundo en su proceso de desarrollo, debido a su abundancia, su facilidad de trabajarlo y a sus más que competentes características para todo tipo de usos.

Aunque se tenga referencia sobre su uso principal en territorios menos desarrollados, normalmente empobrecidos y zonas rurales, cada vez encontramos más construcciones en áreas urbanas y desarrolladas sustentadas con este material, natural y ecológico, denominado por algunos como el acero vegetal debido a sus cualidades. En ocasiones el bambú actúa como único elemento y resiste el todas las cargas (Figura 1), pero en otras ocasiones puede aparecer con un papel más secundario, formando parte de elementos de la estructura que no están sometido a elevadas cargas pero no por ello menos importante (Figura 2).



Figura 1: Kontum Indochine Café, Kon Tum (Vietnam).
Fuente: dossierarquitectura.com



Figura 2: Cubierta de la terminal T4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.
Fuente: ABC.es

En el mundo de la arquitectura de vanguardia, y en el resto de ámbitos, está cobrando cada vez más importancia y se valora cada vez más este material debido a su estética, a su facilidad de trabajo y a su valor medioambiental, ya que es un excelente sumidero de carbono y un recurso forestal con gran capacidad que todavía no se ha explotado acorde a sus posibilidades.

1.2 Objetivos.

El objetivo general de este trabajo es estudiar la aptitud del bambú como elemento estructural en pasarelas y puentes comparando su comportamiento resistente con el material madera para dos tipologías de pasarela.

Por un lado, se trata de un campo de estudio interesante debido al gran potencial del bambú. Se trata de una planta abundante a nivel global, de rápido crecimiento y con gran capacidad de fijación de carbono. Si a esto se le suma que sus cualidades mecánicas permiten realizar construcciones complejas y que se trata de poner en valor un elemento de naturaleza forestal, ayudando así a proteger y favorecer el correcto mantenimiento de las masas en las que se

encuentra, se podría decir que el bambú es un diamante en bruto al cual se le podría sacar un gran partido si se tomara conciencia a nivel global de las posibilidades que presenta.

Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, el bambú es una planta que ha sido utilizada desde la antigüedad por los humanos que habitaban en las zonas en las que crece, pero donde no se encuentra de manera natural (principalmente Europa) se desconocen muchas de sus cualidades, posibles usos y curiosidades

Por todo esto, a parte del objetivo general, se pueden concretar los tres siguientes objetivos específicos:

- Establecer las bases tecnológicas y mecánicas básicas del bambú con especial atención a su potencialidad estructural (Apartado 2: Revisión del Estado del Arte).
- Diseño, análisis y particularización de las variables de cálculo para las dos tipologías de pasarela en estudio (Apartado 3: Metodología).
- Comprobar la viabilidad técnica y estructural según las comprobaciones en ELU y ELS (Apartado 4: Resultados).
- Mostrar las tendencias futuras y el estado actual de investigaciones, proyectos y usos del bambú a nivel europeo y nacional (Apartado 5: Conclusiones).

2 Revisión del estado del arte.

En este Apartado se van a definir las principales características del bambú, tanto en el ámbito biológico, ecológico y silvícola como en los aspectos antrópicos y estructurales (especies utilizadas, aplicaciones estructurales, propiedades físico-mecánicas del material y características de las uniones).

2.1 Caracteres generales.

2.1.1 Ecología.

El bambú pertenece a la gran familia de las gramíneas. Son plantas que crecen usualmente en selvas de clima cálido, en bosques mesofítico caducifolio y xerfítico caducifolia de Asia, así como en los bosques tropicales lluviosos o, en el caso de los bambúes herbáceos, en la sombra de los bosques cálidos; también a lo largo de corrientes o en áreas descubiertas, algunas veces en la sombra de la vegetación baja. Usualmente dependen de la humedad, la sombra y una temperatura cálida. Abundan en los trópicos y subtrópicos y solo algunas especies leñosas se encuentran en zonas de temperaturas más frías. (Álvarez Castilla, 2012). En la Figura 3 podemos observar su área de distribución a nivel global. Únicamente está ausente en el continente europeo y en la Antártida.

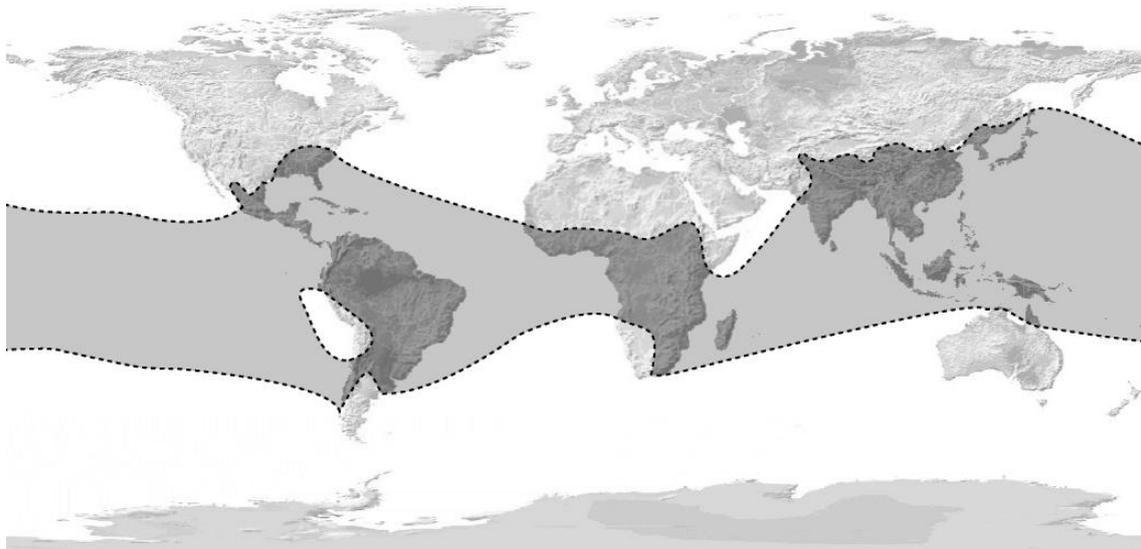


Figura 3: Distribución del bambú a nivel global.

Fuente: Wikipedia.

Botánicamente pertenece a las más primitivas de las gramíneas (como el maíz, la cebada, el arroz, etc.). Se pueden encontrar bambúes herbáceos creciendo en los sotobosques de la selva tropical o bien, bambúes leñosos llegando a aparecer hasta los 4000 m de altitud. Estos últimos son los que nos interesan como material estructural debido a sus características. Posee una estructura de ejes vegetativos segmentados por nudos sólidos, que crecen verticalmente. A diferencia de los árboles, su tallo (denominado caña o culmo) es hueco y dividido por tabiques. Es uniforme en su desarrollo, liviano, resistente, suave, de rápido crecimiento, de bello color e imperceptiblemente cónico. Todas estas características hacen de él un material con multitud de usos y posibilidades (Pereza, 1993). En la Figura 4 se muestra la morfología del bambú con el paso del tiempo y las distintas partes que lo forman.

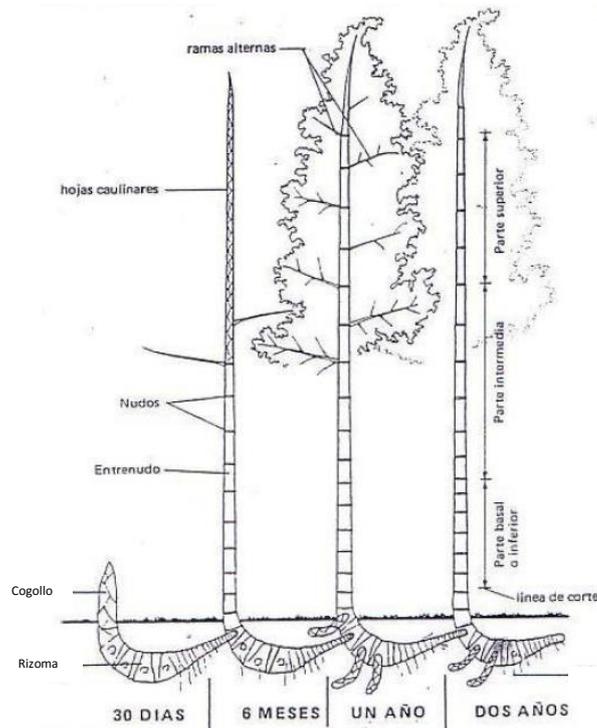


Figura 4: Evolución y partes del bambú.

Fuente: Bambusa.es

El bambú es una planta perenne que se ancla fuertemente al suelo mediante unos gruesos rizomas subterráneos. Estos rizomas son también órganos de reserva en los que la planta acumula nutrientes. Presenta un extremo puntiagudo como una aguja capaz de penetrar suelos muy duros y pedregosos. Además, posee unas yemas redondeadas a partir de las cuales crecerán las cañas o darán lugar a otros rizomas.

Una gran ventaja del bambú es que rebrota tantas veces como lo cortemos. Esto nos garantiza una continuidad en la producción y junto con su rápido crecimiento es una grandísima ventaja a la hora de llevar a cabo su explotación y aprovechamiento. Además, otra de las peculiaridades del bambú es que nace con el máximo diámetro que llegara a alcanzar a lo largo de su vida, el cual disminuye con la altura pero no crece con los años. Esto puede ser una ventaja en cuanto que seremos capaces de prever el grosor de los distintos culmos que se desarrollaran y así inventariar y localizar las varas.

2.1.2 Corte y almacenamiento.

Para que la recolección sea sostenible debe ser “selectiva”. Si se trata de especies monopodiales (cañas separadas uniformemente), la misma se realiza cortando solamente las que están maduras. Si se trata de especies que forman matas, la recolección selectiva se realiza cada 2 - 4 años recortando hasta un 30% del cultivo.

En ambos casos, las estaciones adecuadas para la recolección son el otoño y el invierno. Se aconseja no cortar las cañas por encima de los 30 cm del suelo y no usar la sierra porque impide a la raíz pudrirse, evitando el crecimiento de nuevos brotes.

La mejor herramienta es el machete. Para acelerar la putrefacción de la raíz de la caña cortada, lo ideal es quebrar el muñón de la misma con un corte en cruz. De este modo el agua pluvial penetrará más fácilmente.

La poda se tiene que realizar poniendo cuidado de no impedir que las cañas se sujeten una con otra, de lo contrario crecerán encorvándose. Por cada 4 cañas maduras se genera una nueva. Por lo tanto, se tardan 4 años para remplazar las quitadas. Dentro de una mata la producción de cañas varía con la especie entre 10 y 38 %. El método ideal para asegurar una producción continua es determinar la producción en un año sobre la base del promedio deducido en los últimos 15 años. La primera recolección puede empezar cuando la mata llegue a su completa madurez, es decir alrededor de los 6 años después de su plantación.

En la India se abaten matas cada 3 - 4 años y se dejan aproximadamente 10 cañas por mata manteniendo las jóvenes en la periferia. Estas cañas sirven para sujetar las nuevas y mantener la completa potencia germinativa de los rizomas. Las cañas de bambú de 2 - 5 años son las más adecuadas para generar materia prima.

Con un período de rotación de 3 años, se pueden recoger entre 3.000 a 15.000 cañas por hectárea, que equivale a 7,5 - 38 ton/ha. Para comprender mejor este dato, en Alemania la productividad de leña seca es de 1,4 ton/ha de bosque (Barbaro, 1997).

Tras el abatimiento de las cañas, las ramas se tienen que quitar con cuidado para no dañar la "corteza" que protege contra la humedad y los microorganismos nocivos.

Las cañas tienen que ser colocadas horizontalmente y con apoyos frecuentes, de modo que no se encorven.

Deben estar protegidas del sol, la lluvia y la humedad del terreno. El secado al aire necesita de un período de 6 a 12 semanas, mientras que en el horno tarda solamente 2 o 3 semanas. Algunas especies de bambú no toleran un secado rápido y desarrollan grietas o quebraduras axiales.

La forma ideal de almacenarlas es dentro estantes, donde la primera capa no tiene que estar a menos de 50 cm. del terreno. Eso garantiza una buena circulación del aire y la posibilidad de inspeccionar cada una. Las cañas afectadas por hongos o insectos se tienen que eliminar o tratar inmediatamente.

2.1.3 Comparativa frente a otros materiales.

Desde el punto de vista mecánico, frente a requerimientos energéticos, constructivos, de resistencia y rigidez por unidad de área, facilidad y seguridad de uso, etc, el bambú se puede comparar de manera favorable con materiales de uso común como el hormigón, el acero y la madera.

La gran versatilidad del bambú se debe en gran parte a su estructura anatómica y morfológica. La sección circular ahuecada presenta algunas ventajas estructurales en comparación con secciones macizas o rectangulares de otros materiales.

"El bambú requiere solo el 57% de su masa cuando es usado como viga y solo un 40% cuando es usado como columna" (Janssen, 1988,)

Aunque la composición química de la madera y del bambú no difiere demasiado, el bambú es dos veces más resistente que la madera frente a la tracción uniaxial. La razón de esto es aún desconocida y la hipótesis más creíble es la diferencia entre el ángulo de disposición de la celulosa, las microfibrillas y la célula-eje, siendo 20º para la madera y solo 10º para el bambú. La Figura 5 nos permiten comparar el bambú con algunos materiales muy conocidos y utilizados en nuestro día a día.

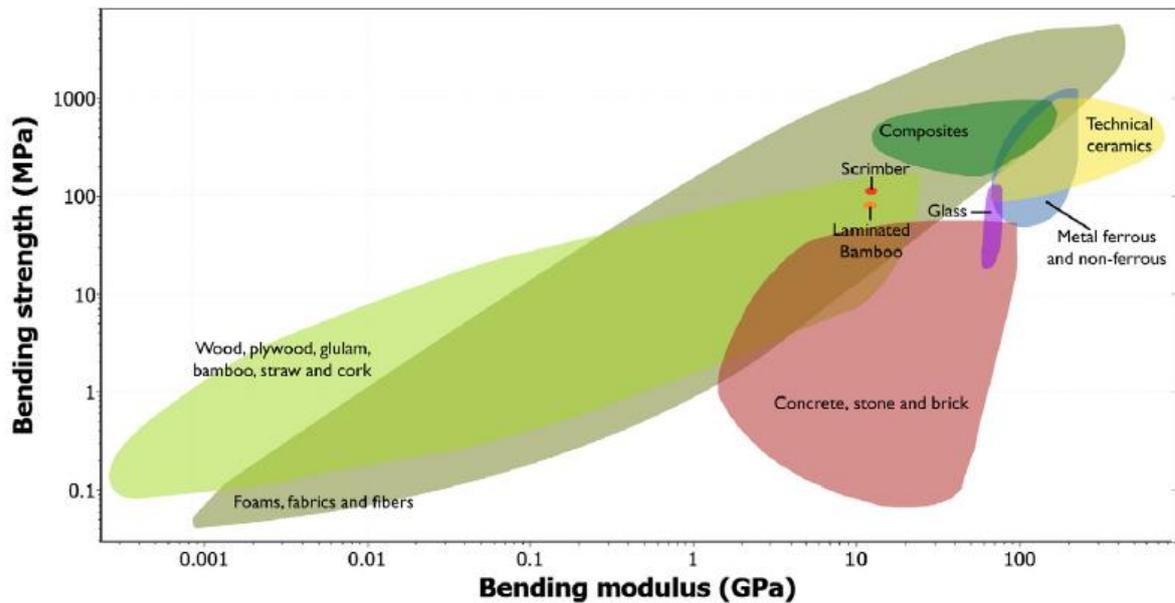


Figura 5: Comparativa de materiales. Resistencia a flexión frente a su módulo de flexión.
Fuente: The Royal Society.

2.2 Aplicaciones del bambú.

Gracias a todas las características nombradas en los Apartados anteriores, desde hace muchos años, los humanos hemos sabido darle multitud de utilidades al bambú. Cuando el nuevo brote de bambú asoma en la tierra, ya trae todo su calibre. Nunca engrosará más. Por esto, es fácil saber qué destino se dará a cada vara con bastante tiempo de antelación, aunque aún tengan que pasar algunos años para que esté listo para su uso.

Dependiendo de la edad a la que se decida cortar el bambú, podemos darle multitud de aplicaciones sin transformarlo considerablemente. Como podemos observar en la Figura 6, desde el comienzo de la vida del bambú podemos darle distintos usos.



Figura 6: Distintos usos del bambú en crudo dependiendo de la madurez a la que se tala.
Fuente: fao.org

Hasta los primeros 30 días es comestible ya que aún es tierno y se puede masticar sin problemas. Además, al no estar endurecido es posible deformarlo con facilidad sin romperlo. Esto es muy útil para la elaboración de utensilios y productos de artesanía.

Entre los primeros seis meses y el primer año la planta ha crecido y se ha endurecido, por lo que ya no es utilizada para consumo humano. Sin embargo, aún es posible deformarla y en mayor medida tejlarla.

A partir de los dos años, el bambú ya es bastante rígido y su uso se va enfocando a aplicaciones que requieren más resistencia y dureza. Es empleado para hacer esterillas (resistentes a la abrasión y la humedad), recipientes de almacenamiento, muebles y diversos útiles.

A partir del tercer año, al bambú ya es lo suficientemente rígido como para emplearlo en la construcción. Puede aparecer como elemento auxiliar de otros materiales, o bien como elemento principal de la estructura. También se alcanza un alto grado de dureza y es por esto que se utiliza como pavimento mediante la elaboración de laminados (Álvarez Castilla, 2012).

Son muchas más las aplicaciones del bambú, aunque requieren de una mayor transformación. El elegante rayón, tan de moda en los últimos tiempos para vestidos, está hecho con fibras de bambú. Durante la II Guerra Mundial, se experimentó con éxito el uso de paneles tejidos de bambú en la construcción aeronáutica. Del bambú se obtienen componentes que se utilizan en cosmética para el cabello y la piel. La industria farmacéutica ha comprobado que ciertas sustancias que se obtienen del bambú poseen efectos anticancerígenos. El carbón obtenido del bambú tiene mayores ventajas que cualquier otro carbón para la fabricación de baterías eléctricas. Y como dato curioso, hay que recordar que Edison utilizó filamentos carbonizados de bambú en sus experimentos para descubrir la lámpara incandescente (Jorge H. Arcila Losada, 1993).

El bambú presenta múltiples usos en muy diversos ámbitos. Hay uno especialmente trascendental: la fabricación de papel. Cada año se sacrifican miles de hectáreas de bosque para utilizar los troncos de miles y miles de árboles en la producción de papel.

Frecuentemente, esos bosques no se repueblan jamás. A veces, porque es imposible: el ser humano no es capaz de imitar la complejidad y variedad de un bosque natural. Otras veces, los criterios cortoplacistas de las empresas explotadora-expoliadoras del bosque no incluyen la inversión en reforestación. En otras ocasiones, se prefiere destinar las tierras de bosque arrasado a fines teóricamente más rentables (ganadería extensiva o agricultura de frontera).

El bambú es una alternativa. Sobre el bosque tiene la ventaja de que puede ser manejado durante períodos ilimitados de tiempo sin muchas dificultades. Y además, la fibra de bambú es mejor que la mejor fibra de madera para fabricar papel. La utilidad de una fibra se calcula en función de su relación largo-ancho. Cuanto más larga y más estrecha sea la fibra, mejor papel produce. La fibra de bambú resulta ser mucho más apropiada que cualquier otra. Para saber cuánto bambú hace falta para producir papel, existen ya cálculos bastante precisos: una hectárea de bambuzal produce aproximadamente una tonelada de pulpa de papel (Pereza, 1993).

Por si fueran pocas las aplicaciones ya nombradas, además empleamos el bambú sin cortar como elemento decorativo. Es una de las plantas por excelencia en el mundo de la jardinería debido a sus colores y su estilizada forma, que conjuga a la perfección con el resto de plantas ornamentales.

2.3 Especies más utilizadas.

A continuación la Tabla 1 expone una lista de los bambúes más comúnmente utilizados en la construcción así como sus principales características. Se clasifican según los distintos géneros a los que pertenecen.

Tabla 1: Géneros y características. *Adaptación de American Bamboo Society.*

Genero	Altura (m)	Diámetro (cm)	Origen
Bambusa	6 a 30	3 a 18	China, India, Birmania y Taiwán
Chusquea	4 a 6	2 a 4	Chile y Argentina
Dendrocalamus	20 a 35	20 a 30	India, Birmania, Sri Lanka y Taiwán
Gigantochla	10 a 16	8 a 15	Malasia, Indonesia y Filipinas
Guadua	10 a 30	5 a 15	Colombia, Ecuador, México, Bolivia y Panamá
Phyllostachys	5 a 22	2 a 17	China y Japón

Como se puede apreciar en la tabla anterior, predominan claramente dos zonas en el mundo en lo que a uso de bambú estructural se refiere. Por un lado, tenemos los países del Sur-Este Asiático, y por otro la zona de América del Sur.

En la zona Asiática, el principal genero de bambú utilizado con fin estructural es el *Dendrocalamus*, dentro del cual, la principal especie es *Dendrocalamus giganteus*. Se trata de una de las especies más grande que existe, con diámetros superiores a los 30 cm. Es capaz de crecer a una velocidad de más de 30 cm por día alcanzando holgadamente los 30 metros de altura. También es muy utilizado para la producción de papel y la elaboración de muebles.

Al otro lado del Pacífico, en el continente americano, el género predominante es la *Guadua*, concretamente la especie *Guadua angustifolia*. Presenta un diámetro de entre 9 y 15 cm aunque excepcionalmente, si se haya en buenas condiciones puede alcanzar hasta los 21 cm. Su crecimiento diario en altura ronda los 12 cm, alcanzando el 80-90% de su altura máxima en tan solo 3 meses. Llega a medir entre 15 y 30 metros.

2.4 Aplicaciones estructurales.

2.4.1 Ámbito de uso.

El bambú es utilizado en todas las regiones del mundo, incluida Europa, que aunque no posea plantaciones, sí que importa bambú en rollo y productos ya transformados de países productores. Obviamente, en los países en los que abunda este material su uso está más generalizado. Estamos hablando de la gran mayoría de los países de la zona tropical del continente africano, los países del sud-este asiático, India, China, Japón y toda la zona comprendida entre el sur de México y el norte de Argentina.

En el ámbito estructural, en el mundo occidental todavía se mira con cierto recelo a las estructuras de bambú debido a que se asocia este material a cabañas en la selva o a casas muy humildes de gente sin recursos. Y nada más lejos de la realidad, al ser un material abundante, accesible y económico, es muy utilizado para estos fines. Ahora bien, esto no quita que el bambú sea un excelente material para el desarrollo de estructuras complejas y dignas de admirar.

Las técnicas utilizadas para la construcción en bambú son muy diversas. Con este material se pueden realizar desde las estructuras más simples (un grupo de varas atadas unas a otras para sortear un riachuelo o formar una cubierta) hasta las más complejas (puentes, grandes edificios o andamiajes) como se puede observar en las Figuras 7 y 8.



Figura 7: Cabaña de bambú y hojas de palmera en Mae Taeng (Tailandia).

Fuente: 4puntoscardinales.es



Figura 8: Andamiaje de bambú en la ciudad de Kowloon, Hong Kong (China).

Fuente: CNN.

En la Figura 8 podemos observar un andamio completamente realizado con bambú. Para darnos cuenta de la envergadura de esta estructura auxiliar, el edificio alrededor del cual se ha construido tiene más de 10 plantas. Esto no es una excepción o un caso aislado, en gran parte del continente asiático los andamiajes se elaboran con varas de bambú debido a que es muy económico y sus prestaciones mecánicas permiten trabajar de una forma correcta y segura, de la misma forma que si fuera de metal, como estamos acostumbrados a ver en Europa. A parte, la manejabilidad de las piezas que lo componen es infinitamente mayor a la de los andamios convencionales ya que son más ligeras y ocupan menor espacio.

2.4.2 El bambú como elemento constructivo.

El uso del bambú es apto para casi la totalidad de las partes de una estructura. Al tratarse de un material natural de origen biológico puede presentar problemas en lo referente a la durabilidad si no se adoptan ciertas medidas. Al igual que la madera, es deseable evitar el contacto directo con el agua. Si es posible se debe aislar las partes de bambú del suelo para evitar humedades y el ataque tanto de insectos como de hongos. Y por último, se recomienda evitar la exposición directa a la radiación solar, aunque sus repercusiones no son tan importantes como las del agua.

Por todo esto, los lugares menos indicados para el bambú en cuanto a lo que la durabilidad se refiere serán los cimientos y las cubiertas, aunque estas últimas sí es habitual encontrarlas de

este material ya que es muy abundante y la durabilidad, aunque se ve reducida por los factores nombrados, sigue siendo aceptable. Además, la forma de las varas del bambú es aprovechada para facilitar el desagüe de los tejados y evitar acumulaciones de humedad.

En lo referente a su comportamiento como elemento estructural, en el Apartado siguiente estudiaremos frente a que esfuerzos se comporta mejor para así seleccionar las zonas óptimas de trabajo dentro de una estructura.

2.5 Propiedades físico-mecánicas.

Es sabido que el bambú es un material muy resistente y algunas de sus cualidades están por encima de las de la madera, con la gran ventaja de que la edad de explotación de esta gramínea viene siendo la quinta parte del tiempo que necesitan algunas especies maderables para su uso. Existen muchos motivos para estudiar con más detalle las propiedades físicas y mecánicas de este vegetal, y analizar los puntos débiles que presenta para proponer mejoras que contribuyan al comportamiento óptimo estructural y al acercamiento entre los modelos matemáticos y reales.

A continuación se presentan algunas propiedades físicas y se analizan los distintos esfuerzos a los que puede ser sometido el bambú durante su vida como elemento de una estructura, y para finalizar una tabla con los datos objetivos de las distintas propiedades.

2.5.1 Peso específico.

Varía con la humedad, pero para cañas secadas al aire (18% de humedad), oscila entre 700 y 850 kg/m³, dependiendo de si se tiene en cuenta solo la pared. El peso específico depende también de la porción de caña analizada: a la base ronda los 0,57 kg/dm³ (mayor volumen hueco) y en la cima 0,76 kg/dm³ (Barbaro, 1997).

2.5.2 Conductividad térmica.

Expresa el poder aislante de un material: cuanto más baja es, más poder aislante tiene. En el bambú depende del sentido de propagación del flujo de calor y del elemento que se esté ensayando. Por ejemplo, la propagación en sentido perpendicular a las fibras en material secado en horno es de 0.088 Kcal/m·h·°C para el bambú frente a 0.104 Kcal/m·h·°C que presenta el abeto común, o en sentido paralelo en el cual la diferencia es mayor obteniéndose valores de 0.143 Kcal/m·h·°C frente a las 0.191 Kcal/m·h·°C respectivamente (Barbaro, 1997).

2.5.3 Compresión.

Gran parte del bambú empleado en construcción está sometido a compresión paralela a la fibra, por ejemplo, en columnas, vigas, soportes, montantes y otros, los cuales están sujetos a cargas que tienden a aplastar o a acortar los miembros longitudinalmente.

La resistencia del bambú a la compresión es relativamente alta, pero carece de significado si no se especifica el grado de sazónamiento y la relación entre la longitud y el diámetro de la pieza. Dicho de otra forma, si no se conoce la esbeltez de la pieza a estudiar y no se define la curación del bambú, no se podrá precisar correctamente la resistencia frente a este esfuerzo

ya que sus características varían. A mayor humedad tenemos peores prestaciones. Además, la relación longitud-sección mínima también es de vital importancia para prevenir el pandeo. Como se verá más adelante en el Apartado del cálculo de la estructura, la normativa colombiana (NSR-10, 2010) de especial relevancia para estudiar el comportamiento del bambú en estructuras nos diferencia tres tipos de restricciones distintas para el pandeo en función de la esbeltez de la pieza a estudiar.

2.5.4 Tracción.

Depende del elemento de la caña ensayado (base, centro o cima), del % de humedad, del elemento a ensayar y de la presencia o no de nudos.

Se trata del esfuerzo más complicado de todos a los que se enfrentan las estructuras de bambú. Los métodos mediante los cuales se unen las diversas piezas hacen que al aparecer esfuerzos de tracción, estas se rajen debido a los herrajes. Es por esto que no es fácil encontrar valores de la resistencia del material frente a este tipo de cargas.

2.5.5 Módulo de elasticidad.

Es un coeficiente adimensional y se define como la relación lineal, conocida como la Ley de Hooke, entre la tensión debida a la carga aplicada al material y su deformación.

Al igual que en la madera tradicional, decrece de un 5 - 10% con el aumento de la carga. Depende del tipo de esfuerzo aplicado, y del tipo de fibra (interna o externa de la sección solicitada). Desde un punto de vista estructural, para cañas enteras sometidas a flexión se puede adoptar el dato promedio reflejado en la Tabla 2.

2.5.6 Cortante.

El esfuerzo cortante es una medida de la capacidad de resistir fuerzas que tienden a producir deslizamiento de una porción del material con relación a otra porción adyacente. El corte es una fuerza que actúa paralelamente a un plano, en contraste a las de tensión y compresión que son perpendiculares al área considerada. La fractura por corte es muy diferente de la tensión o compresión puesto que no hay reducción localizada del área, ni tampoco alargamiento.

Este esfuerzo tendremos que tenerlo muy en cuenta especialmente en el diseño de las uniones o juntas. La mayoría de estos componentes constructivos están sujetos a corte paralelo a la fibra. En culmos con paredes de 10 mm de espesor, el esfuerzo cortante es aproximadamente un 11 % más bajo que para culmos con paredes de 6 mm de espesor debido a la distribución y mayor porcentaje de fibras fuertes en la sección transversal (Rodríguez y Morales, 2008).

La Tabla 2 muestra el orden de magnitud de los valores numéricos de la guadua para las propiedades mecánicas más significativas vistas anteriormente según el estudio (López y Correal, 2009). Por otro lado, en sentido perpendicular a la fibra, la resistencia del bambú es menor y más penalizada que la madera estructural.

Tabla 2: Propiedades mecánicas del bambú.

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%
Modulo 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%

2.6 Uniones.

El cálculo de elementos con bambú, al igual que con madera puede llevar a una situación muy peligrosa: que los elementos sean suficientemente fuertes para el trabajo deseado, pero que las uniones sean débiles. Gracias a todo lo que se ha trabajado hasta el momento, se sabe que las uniones requieren de mucho cuidado y son el punto más débil.

La madera cuenta con múltiples tecnologías para solucionar las uniones. Por lo contrario, para el bambú existen soluciones tradicionales, pero la dificultad se manifiesta cuando se trata de hacer uniones que soporten esfuerzos a tracción. Las cerchas que se han construido realmente no funcionan como tal, pues las uniones trabajan pobremente a tracción ya que generalmente son unos pocos clavos que terminan por rajar los elementos.

Uno de los primeros en realizar un estudio académico de las cerchas de bambú fue el ingeniero holandés Dr. Jules Janssen quien en 1974 probó en la Universidad Tecnológica de Eindhoven (Países Bajos) más de 50 uniones diferentes con bambú filipino, con base en las cuales construyó 5 cerchas de 8 metros de luz, a las que sometió a esfuerzos. Las cargas eran análogas a las de una cubierta en asbesto cemento o zinc. Estas cerchas se probaron acostadas en el piso del laboratorio. Los diseños propuestos por Janssen son simples, y satisfacen las necesidades de una comunidad que necesita una cubierta (ProNAP, 2013).

El planteamiento general para el diseño de conexiones debe tener como referente evitar al máximo la presencia de esfuerzos que provoquen la rajadura en las piezas de bambú. También se hace hincapié en la simplificación de las uniones para lograr los objetivos que se plantean, atendiendo principalmente a la arquitectura con estructuras ligeras.



Figura 9: Unión cónica con esfera, J. Stamm.

Fuente: bambumex.org

2.7 Síntesis.

Visto todo lo expuesto anteriormente, el bambú es un excelente material para utilizarlo como elemento estructural. Como hemos mencionado en el Apartado de las propiedades mecánicas,

posee gran cantidad de virtudes y alguna que otra desventaja, como todos los materiales que se conocen. Por ejemplo, el hormigón es un fantástico elemento que trabaja muy eficientemente frente a esfuerzos de compresión, pero que al someterlo a esfuerzos de tracción, falla con facilidad.

Al hablar de utilizar bambú con fines estructurales no solo se hace referencia a pequeñas construcciones o elementos simples de dimensiones reducidas. Nada más lejos de la realidad, estamos hablando de crear estructuras complejas, de tamaño considerable y que estén sometidas a una serie de cargas que requieran de un diseño técnico y de una elevada tecnificación a la hora del ensamblaje y la construcción.

Por todo esto, se ha decidido realizar un estudio comparativo que haga latente la eficiencia del bambú para estos fines. Para ello, se va a estudiar una estructura, concretamente un puente. Se va a llevar a cabo una comparativa frente al otro material por excelencia utilizado en la construcción “verde” o construcción sostenible, la madera.

Ambos materiales son respetuosos con el medio ambiente ya que su origen es biológico, y no representan un grave problema tras su vida útil como parte de una estructura ya que son fácilmente aprovechables para otros fines (bioenergía). Por el contrario, al tratarse de materiales generados por organismos y tener un carácter biodegradable, presentan un hándicap en el campo de la durabilidad. Los elementos atmosféricos como el sol, la lluvia o la mera humedad del ambiente afectan a estos materiales, acortando su vida útil. Además, también pueden ser atacados por otros organismos vivos (bacterias, hongos o insectos) que se alimentan o necesitan de ellos para completar su ciclo vital.

Esta es posiblemente la mayor problemática que presentan las estructuras realizadas en materiales de origen biológico, aunque, si bien es cierto, con un correcto tratamiento, los ataques y los efectos de los mismos pueden reducirse e incluso eliminarse. Estos tratamientos hacen encarecer el coste de la construcción ya que se requiere un mantenimiento que con otros materiales sería mucho más reducido y por tanto, más económico.

Además de esto, es posible pensar que el bambú puede llegar a ser peligroso en estructuras de grandes dimensiones. Esta inseguridad y desconfianza en este material nace del desconocimiento de sus propiedades y de la falta de familiarización con dicho material en las construcciones del mundo occidental. La imagen que se tiene del bambú es la de un material utilizado por los indígenas para elaborar sus chozas y sus elementos de artesanía. Pero esta visión hace tiempo que está cambiando, y en gran parte gracias a ingenieros y arquitectos de todo el mundo concienciados de la capacidad del bambú y de sus múltiples ventajas y poniendo en valor las cualidades de este material.

Un ejemplo de esta nueva tendencia son las realizaciones de Simón Vélez. Este arquitecto colombiano se caracteriza por un estilo arquitectónico que él mismo lo define como “un diseño comprometido con el tema ambiental y los recursos naturales renovables” (Plataforma Arquitectura, 2013).

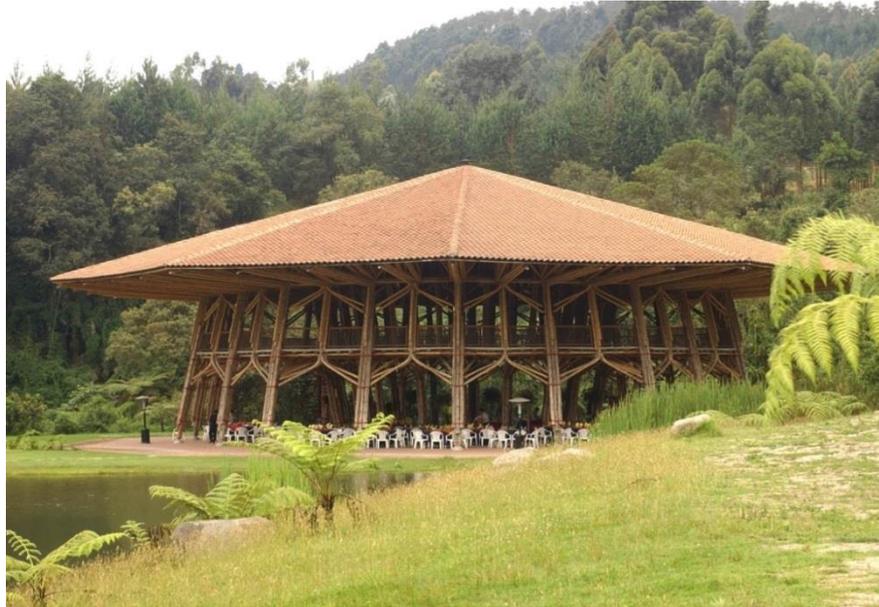


Figura 10: Réplica del pabellón de la guadua de la Expo-Hannover 2000, Manizales (Colombia).
Fuente: plataformaarquitectura.cl

La obra por la que éste arquitecto se dio a conocer al mundo entero fue el pabellón de la Expo-Hannover 2000 (Figura 10). Diseño realizado utilizando como material principal el bambú. El número de pruebas de cargas y resistencia que pasó la estructura para poder obtener la licencia de construcción del pabellón en Alemania, hizo que el bambú quedara homologado como material de construcción en uno de los países más estrictos en cuanto a Normas de construcción, confirmándolo así como un material apto para la edificación a nivel mundial.

Por su parte, centrando la atención en las tipologías estructurales en estudio particular en este trabajo; puentes y pasarelas, hay que señalar en primer lugar que no es nuevo la idea de construirlos en bambú. Se encuentran multitud de ejemplos a lo largo de la historia y en todo el mundo.



Figura 11: Puente de bambú sobre el río Serayu en Java, Indonesia.
Fuente: Wikipedia



Figura 12: Paso elevado en la ciudad de Puebla (México).
Fuente: Wikipedia.

En resumen, el estudio técnico de las estructuras en bambú ha avanzado significativamente en las últimas décadas gracias al impulso de arquitectos e ingenieros que a nivel internacional utilizan el bambú en ámbitos mucho más exigentes que los tradicionales de la construcción en bambú.

3 Metodología.

En este Apartado se va a contextualizar brevemente la idea original de la que surgen las distintas tipologías de pasarelas en estudio. Se describen los modelos a desarrollar y los materiales de los cuales están realizados. Además, también se presentan las acciones y combinaciones de carga, con sus respectivas magnitudes y posible presencia simultánea.

Una vez establecidas los modelos y bases de cálculo, se procederá al cálculo de las estructuras y al dimensionado de las barras de las estructuras en estudio.

3.1 Antecedentes.

En 1994, cerca del pico más alto de los Andes colombianos, el volcán Nevado de Huila, se produjo un fuerte terremoto tras una época de lluvias muy intensas, produciéndose una avalancha de barro y lodo, acabando con la vida de más de 2.000 personas y dejando sin hogar a otras 120.000. Para la reconstrucción del área destruida era necesario utilizar materiales lo más cercanos posibles debido a la mala accesibilidad a la zona, y por ello se escogió el proyecto de Jörg Stamm, un entusiasta de la construcción sostenible y con un objetivo muy claro, ayudar en el desarrollo de los países de América del Sur (Bambus – RWTH Aachen, 2002).

La morfología original del puente se muestra en las Figuras 13 y 14.

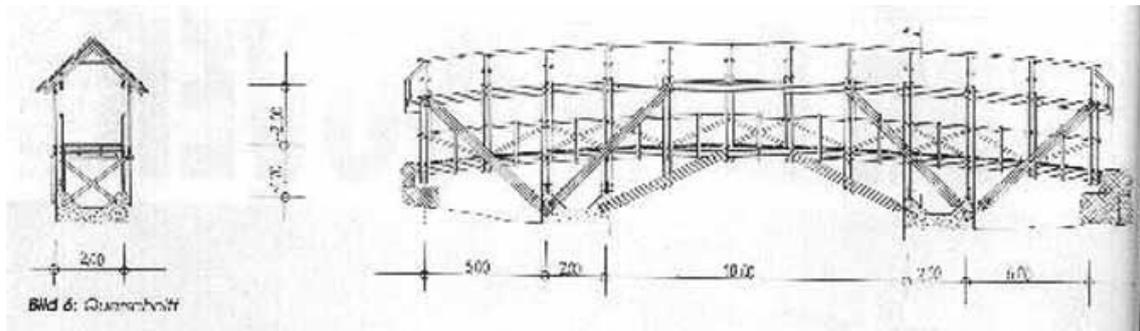


Figura 13: Diseño de puente de bambú de Jörg Stamm.

Fuente: bambus.rwth-aachen.



Figura 14: El mismo puente ya finalizado.

Fuente: bambus.rwth-aachen.

Debido a la localización y al uso para el cual está diseñado, el puente no tiene una gran envergadura. Su principal función es salvar pequeños accidentes geográficos como torrentes y cauces de ríos para evitar el aislamiento de las poblaciones de la zona, pudiendo permitir el tránsito y el comercio. Está diseñado para soportar hasta un vehículo de 2 toneladas

El tablero del puente presenta una longitud de 24 metros, pero realmente, los apoyos salvan una luz máxima de 10 metros. Desde un extremo hasta el primer apoyo hay 5 m, desde este apoyo al siguiente 2 m más, y desde este segundo apoyo hasta el siguiente encontramos los 10 m que mencionábamos anteriormente.

En la altura, desde el tablero y hasta llegar al plano en el que comienza la cubierta, tenemos 2,1 m. Y en cuanto a la anchura tenemos 2,5 m. Esto permite el tránsito de peatones de manera más que cómoda y también posibilita el uso a carros de tracción animal o cualquier otro tipo de vehículo a motor como pequeñas camionetas.

3.2 Descripción.

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar la viabilidad estructural del bambú en su uso en pasarelas y puentes. De este modo, las pasarelas en estudio se basan en la estructura previa de Jörg Stamm expuesta en el Apartado anterior pero con algunas modificaciones, como se puede observar en la Figuras 15 y 16. Además, el trabajo analiza las tipologías propuestas en dos materiales distintos: madera maciza y bambú, para responder satisfactoriamente a los objetivos particulares propuestos.

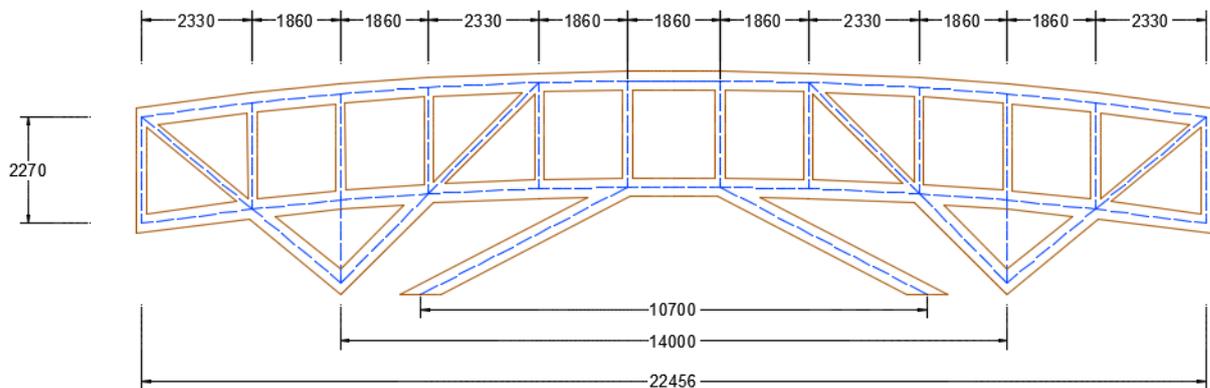


Figura 15: Geometría tipología 1.

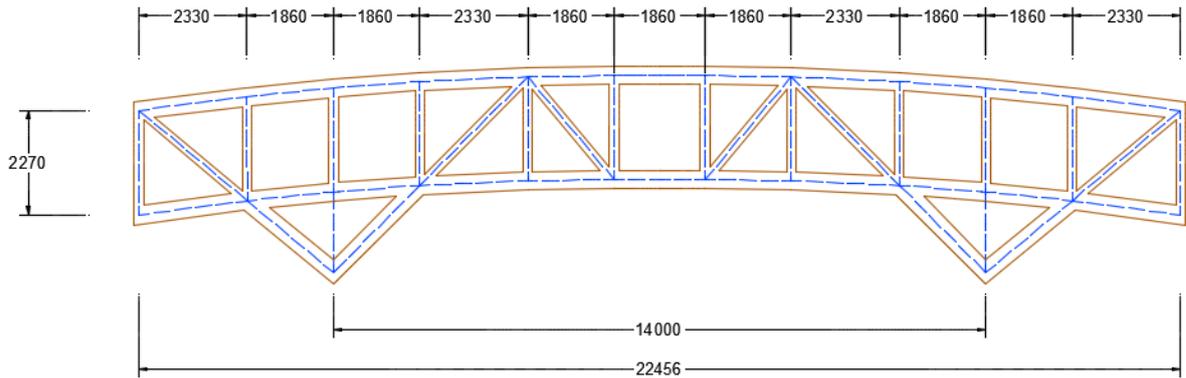


Figura 16: Geometría tipología 2.

En la Figura 15 se ha representado la pasarela de un modo muy similar al diseño original pero ajustando las dimensiones de las barras. Por su parte, la Figura 16 muestra la tipología 2 que elimina los apoyos interiores consiguiendo aumentar la luz entre estribos y dándole mayor valor estético.

3.3 Materiales.

La estructura está compuesta por barras de madera maciza. Concretamente de madera de conífera de calidad C24, con unas características que pueden verse en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades de la madera.

Flexión	$f_{m,k}$	24
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	14
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,5
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	21
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,5
Cortante	$f_{v,k}$	2,5
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,med}$	11000
Módulo de elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,k}$	7400
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,med}$	370
Módulo de cortante medio	G	690
Densidad característica	ρ_k	350
Densidad media	ρ_{med}	420

*Todos los valores se encuentran en N/mm^2 a excepción de las densidades, cuyas unidades son Kg/m^3 .

Para la elaboración de este puente se han utilizado barras de dos secciones distintas. Los dos arcos y barras de los apoyos tienen una sección de 200x150 mm, mientras que el resto de barras que la componen es de 150x150 mm (Ver Plano 5, Anejo 1).

Por otro lado, las estructuras de bambú se realizarán con *Guadua angustifolia*: especie utilizada para estructuras en Latinoamérica, principalmente Colombia, y de la que mayor número de estudios técnicos y datos experimentales se posee en la literatura científica. De este modo, la Tabla 4 muestra un resumen de los datos mecánicos de la Guadua para diferentes estudios experimentales ("Structural use of Bamboo. The Colombian experience" David Trujillo; "Connections and slab for Bamboo Constructions" Morel Claude Guzman.) Y finalmente, los valores

característicos recogidos en la normativa de referencia en Diseño y Cálculo de Estructuras en Bambú (NSR-10 -REFERENCIA). Igualmente, se observa como dichos valores se comparan con una madera de similares prestaciones mecánicas en términos resistentes que supone elegir una madera de frondosas D40 (CTE SE-M).

Las características mecánicas de este material son las que se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4: Propiedades mecánicas de la *Guadua angustifolia*.

	Estudio 1	Estudio 2	Madera D40	Guadua	Guadua NSR-10
$f_{m,k}$ (Kg/cm ²)	460	740	400	460	458.87
$f_{t,0,k}$ (Kg/cm ²)	900	9+50	240	900	1101.30
$f_{t,90,k}$ (Kg/cm ²)	1		6	1	
$f_{c,0,k}$ (Kg/cm ²)	280	270	260	280	256.97
$f_{c,90,k}$ (Kg/cm ²)	1		83	1	30.84
$f_{v,k}$ (Kg/cm ²)	45	43	40	45	40.38
Densidad media (Kg/m ³)	715	715	660	715	800
Densidad característica (Kg/m ³)			550	550	
Módulo de elasticidad (Kg/cm ²)	118000	178000	130000	118000	96873
Módulo de elasticidad característico (Kg/cm ²)			109000	109000	76479

Para la elaboración de las estructuras de bambú se han utilizado barras compuestas por dos culmos. En la zona de arco y en los apoyos dichos culmos son de 14 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor cada uno, mientras que en las barras restantes se utilizan culmos de 10 cm de diámetro y 1.2 cm de espesor (Ver Plano 5, Anejo 1).

3.4 Acciones previstas en el cálculo.

El emplazamiento elegido para las estructuras tipo no es concreto. Se ha calculado de manera que cabría la posibilidad de ser construida en cualquier punto de la Comunidad Valenciana.

Se han tenido en cuenta las cargas generadas por el peso propio de la estructura, por la sobrecarga estipulada para el uso que se le va a dar y por la posibilidad de acumulación de nieve en las distintas superficies del puente.

Todas las acciones que se describirán a continuación se han evaluado a partir del Código Técnico Seguridad Estructural Acciones en la Edificación (CTE SE-AE) y del Título G de la NSR-10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente). A su vez, se consulta y particulariza la Instrucción sobre las Acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de Carretera que recoge información específica para el caso de pasarelas peatonales (IAP-11).

3.4.1 Magnitud de las acciones.

Se ha decidido concentrar todas las cargas que se distribuyen a lo largo de la superficie como cargas puntuales en los distintos puntos en los que convergen para un mejor manejo de los valores numéricos.

Cargas permanentes:

PESO PROPIO: El peso propio de la estructura se ha contabilizado directamente gracias al programa informático SAP 2000 v16. Se han introducido los valores numéricos de la densidad de la madera utilizada y de la sección de las distintas piezas.

TABLERO Y CUBIERTA:

De la misma forma, el tablero se ha calculado teniendo en cuenta la densidad y la sección. El tablero es de madera maciza C24 con un espesor de 10mm y las pasarelas están compuestas por dos piezas gemelas como las que se han descrito en las figuras 15 y 16 separadas entre sí 2.5 metros, por tanto a cada pieza le corresponderá 1.25 m de superficie.

Densidad → 420 Kg/m ³	}	Carga lineal → 420 · 0.01 · 1.25 = 52.5 Kg/m = 0.53KN/m
Anchura → 1.25 m		
Espesor → 0.01 m		

Por otro lado, aunque no aparezca en el diseño, se ha tenido en cuenta la posibilidad de proteger la pasarela con una cubierta. Dicha cubierta tiene un peso propio que actuará como carga permanente durante la vida del puente y por tanto, debe añadirse en este Apartado.

Se trata de una cubierta simple formada por un tablero de 25 mm sobre el cual se colocan tejas curva.

Tablero de madera 25 mm	0.15 KN/m ²	}	0.15 + 0.5 = 0.65 KN/m ²
Teja curva corriente (2.0 kg/pieza)	0.50 KN/m ²		

Para una correcta evacuación del agua y la nieve se ha decidido darle una inclinación de 20º, por lo que ahora a cada pieza no le corresponderán 1,25 metros de cada mitad de cubierta sino 3.06. Por tanto, la carga de la cubierta expresada de forma lineal será:

$$0.65\text{KN/m}^2 \cdot 3.06\text{m} = 1.99 \approx 2 \text{ KN/m}$$

Ya teniendo las cargas en forma lineal, solo quedaría multiplicarlas por la longitud sobre las que actúan. En este caso, estas pasarelas se dividen en dos longitudes. Encontramos separaciones de 1.86 y 2.33 metros, como se podía apreciar en las Figuras 15 y 16.

Introduciendo los datos resaltados en el programa, obtenemos los siguientes resultados que se muestran en la Figura 17.

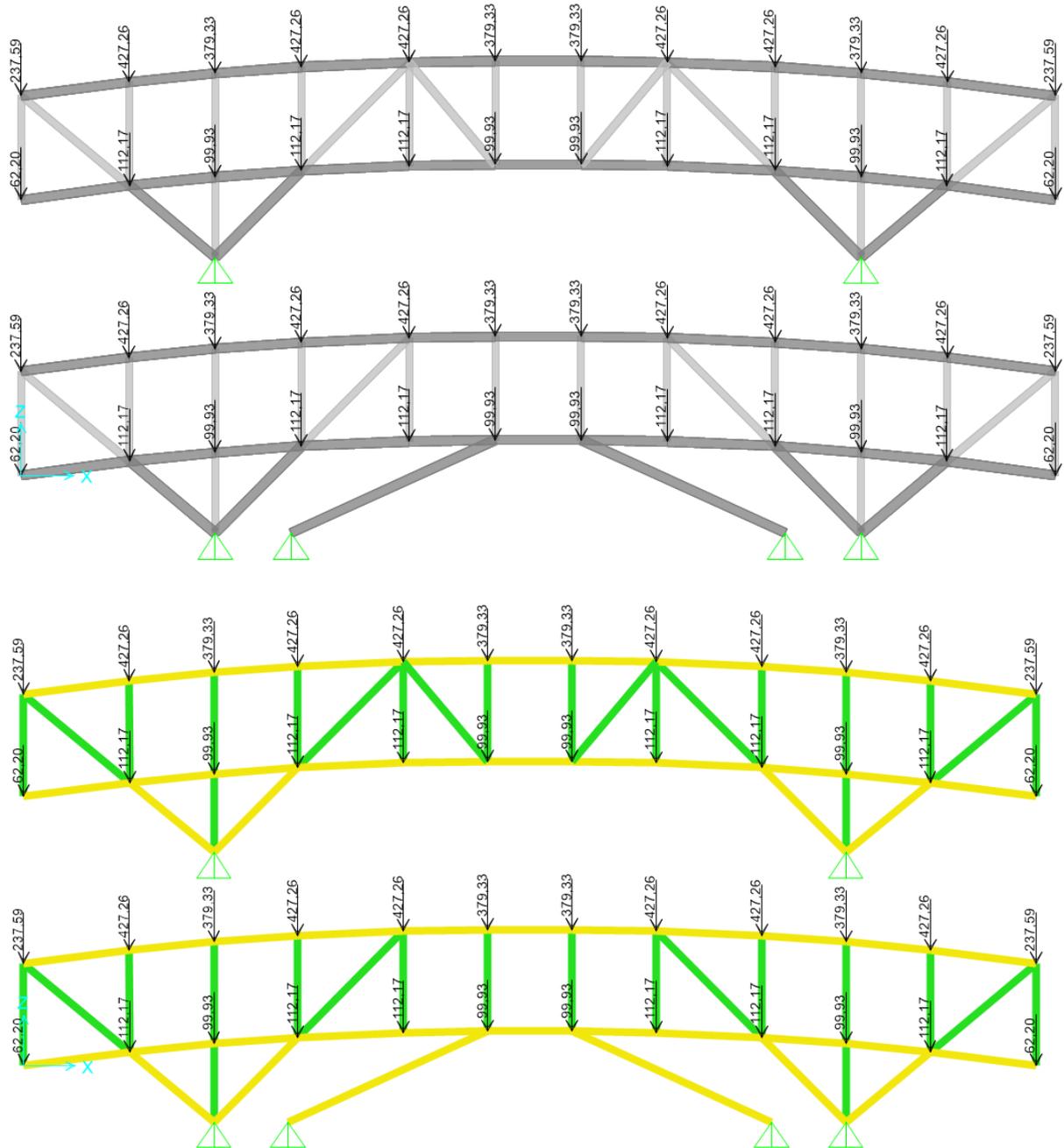


Figura 17: Estructuras de Madera y de Bambú (superior e inferior respectivamente) con carga permanente.

Para no sobrecargar el documento con diagramas similares, el resto de acciones que actúan sobre la estructura y que se describen a continuación no van acompañadas de su respectiva figura. Se ha optado por esto debido a que se entiende que queda suficientemente clara la idea de cómo se distribuyen las cargas a lo largo de la estructura. De todos modos, en el Anejo 2 se desarrolla de forma extensa y detallada todas las acciones y esfuerzos que actúan en cada una de las barras de la estructura.

Sobrecargas:

En cuanto a la sobrecarga, siguiendo las recomendaciones del IAP-11, se aplicara una sobrecarga uniforme de 5KN/m^2 . Por tanto, para pasar este valor a forma lineal, multiplicaremos por la separación entre piezas (1.25) obteniendo así 6.25 KN/m .

Ya por último, multiplicamos este valor por las distintas distancias y lo introducimos al SAP2000.

Nieve:

Para el calculo de la nieve, se presupone que la superficie sobre la que actuara (y que es la mas desfavorable) es la de la cubierta.

El valor de la carga que ocasiona la nieve, según el CTE SE-M, se obtiene multiplicando el valor característico que depende de la zona y la altitud, por el coeficiente de forma de la superficie sobre la que actua.

Tipo de superficie	Puede deslizar la nieve			Impedido
Angulo de inclinación de la cubierta α	$0 \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30 \leq \alpha \leq 60$	$\alpha \geq 60$	Indep.
Coeficiente de forma μ	1	$(60 - \alpha)/30$	0	1

La zona elegida para la posible ubicación de la pasarela es la Comunidad Valenciana. Toda ella pertenece a una misma zonas climática invernal según SE-AE. La altitud máxima que se ha considerado para el posible emplazamiento ha sido 500 m.



Altitud (m)	Zona de clima invernal según SE-AE						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
200	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
400	0.6	0.6	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2
500	0.7	0.7	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2
600	0.9	0.9	0.3	0.5	0.5	0.4	0.2
700	1.0	1.0	0.4	0.6	0.6	0.5	0.2
800	1.2	1.1	0.5	0.8	0.7	0.7	0.2
900	1.4	1.3	0.6	1.0	0.8	0.9	0.2
1000	1.7	1.5	0.7	1.2	0.9	1.2	0.2
1200	2.3	2.0	1.1	1.9	1.3	2.0	0.2
1400	3.2	2.6	1.7	3.0	1.8	3.3	0.2
1600	4.3	3.5	2.6	4.6	2.5	5.5	0.2
1800	-	4.6	4.0	-	-	9.3	0.2
2200	-	8.0	-	-	-	-	-

Ya que la cubierta que se supone presenta una pendiente de 20°, nos queda un cálculo muy sencillo:

$$q_n = \mu \cdot s_k = 1 \cdot 0.4 = 0.4 \rightarrow \text{Multiplicado a su vez por la separación: } 0.4 \cdot 1.25 = 0.5 \text{ KN/m}$$

q_n Valor de la carga de nieve por unidad de superficie de proyección horizontal

s_k Valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**)

μ Coeficiente de forma. Tiene en cuenta el depósito irregular de nieve por efecto del viento. Sus valores se obtienen de la tabla siguiente:

De la misma forma que las anteriores acciones, introducimos este valor en el programa informático multiplicado por la longitud sobre la que actúa.

Viento:

Por último, se introducirá la acción debida al viento. Para ello, nos basaremos en la siguiente expresión (IAP-11):

$$q_e = q_b \cdot c_e \pm 0.9 \cdot A$$

q_b Presión dinámica del viento.

c_e Coeficiente de exposición. Según la altura del punto considerado y el grado de aspereza del entorno.

A Superficie expuesta; planta del tablero.

La presión dinámica viene determinada por la zona geográfica, que en este caso es de 0.42KN/m².

Para el coeficiente de exposición se ha supuesto una zona tipo IV (zona urbana general, industrial o forestal) con una altura de unos 5m, obteniéndose así un valor de 1.3. En función de si estamos considerando viento presión (V_p) o viento succión (V_s) estas acciones tendrán un efecto favorable o desfavorable respecto al resto de acciones de cálculo.

El área del tablero es de 56.15 m².

Esto nos deja dos cargas de viento:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_p = 51.41 \text{ KN} \rightarrow 2.29 \text{ KN/m} \\ V_s = 8.96 \text{ KN} \rightarrow 0.39 \text{ KN/m} \end{array} \right.$$

De idéntica forma, si multiplicamos estos valores por las longitudes sobre las que actúan obtendremos los valores a introducir.

3.4.2 Combinaciones de cargas.

Este Apartado expone las posibles situaciones que podrían hacer alcanzar a la estructura un estado límite. Las cargas anteriormente definidas se combinan y rectifican mediante unos coeficientes con el fin de garantizar la seguridad de la estructura.

La carga permanente se mayorará en todos los casos (a excepción de la hipótesis 6) con un coeficiente de 1.35; las cargas variables, siempre que sean principales se mayorarán por 1.5; y las cargas variables secundarias (nieve) se mayorará por un valor de combinación de 0.75. Finalmente, en el caso del viento presión, se aplican los coeficientes de combinación de acción del viento como acción secundaria que resulta en 0.45 (IAP-11).

A continuación, en la Tabla 5 se presentan las distintas combinaciones que se consideran más desfavorables.

Tabla 5: Combinaciones de cargas.

Combinación	C. Permanente	Sobrecarga	Nieve	Viento presión	Viento succión
1	1.35				
2	1.35	1.5			
3	1.35		1.5		
4	1.35	1.5	0.75		
5	1.35	1.5	0.75	0.45	
6	0.8				1.5

3.5 Cálculo de la estructura.

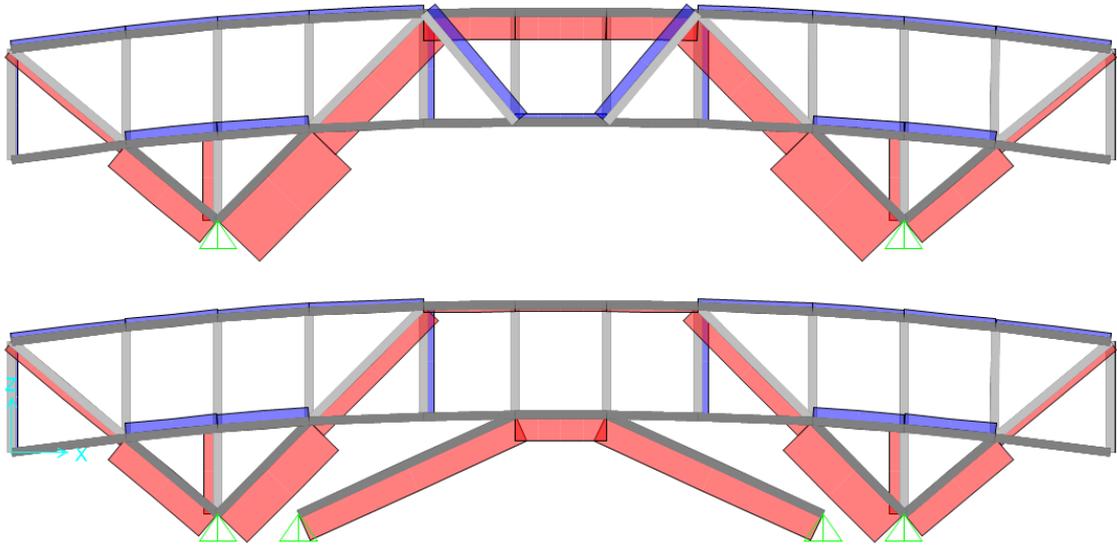
El cálculo se ha realizado mediante el programa informático SAP2000 v.16. Entre muchas otras funciones, este programa realiza el análisis elástico lineal y estático de estructuras espaciales de barras.

Con todas las acciones anteriormente descritas introducidas en el software, las propiedades mecánicas del material, la geometría y secciones de la estructura se calculan las diferentes tipologías según puede consultarse en el ANEJO 2.

Por su parte, las Figuras 18 y 19 muestran un resumen gráfico de los resultados de esfuerzos para la combinación más desfavorable (Combinación 5).

MADERA C24

Axiles



Momentos

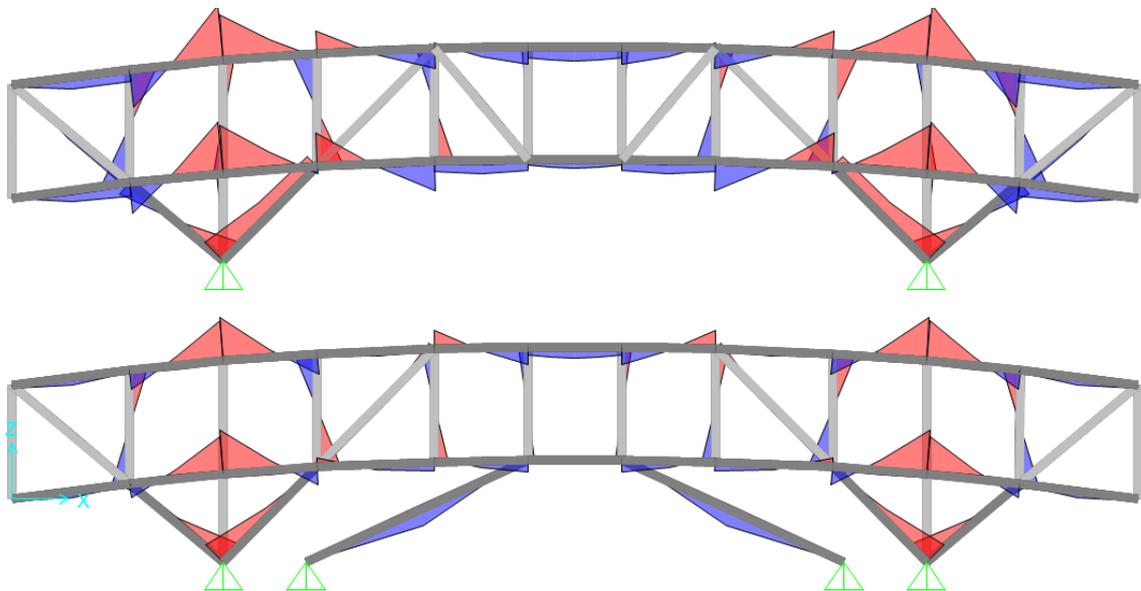
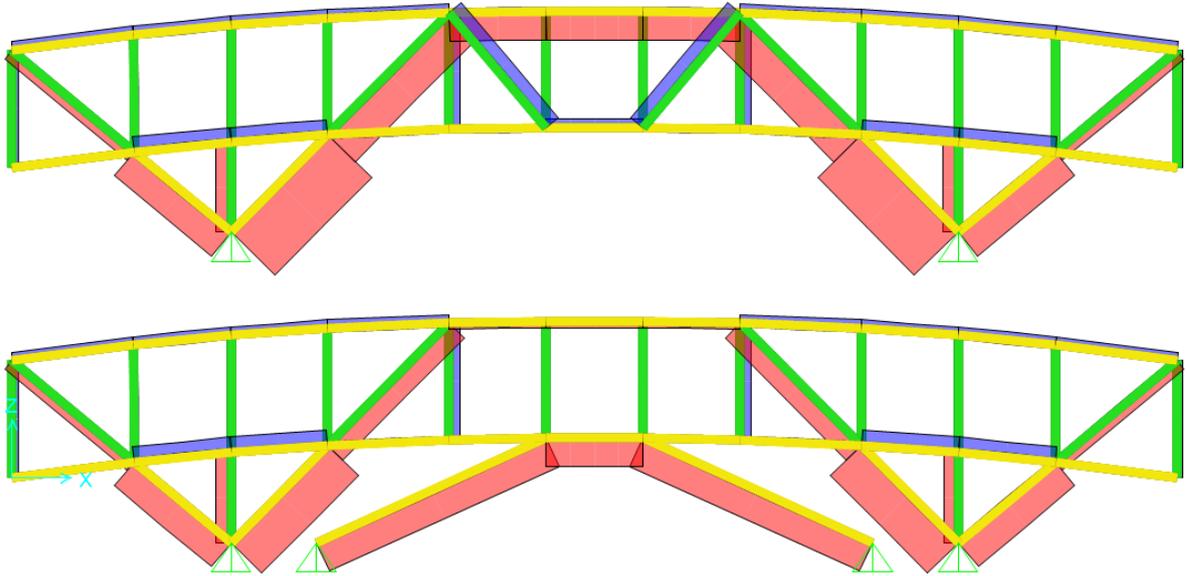


Figura 18: Momentos y Axiles en estructuras de madera para la combinación 5.

BAMBÚ

Axiles



Momentos

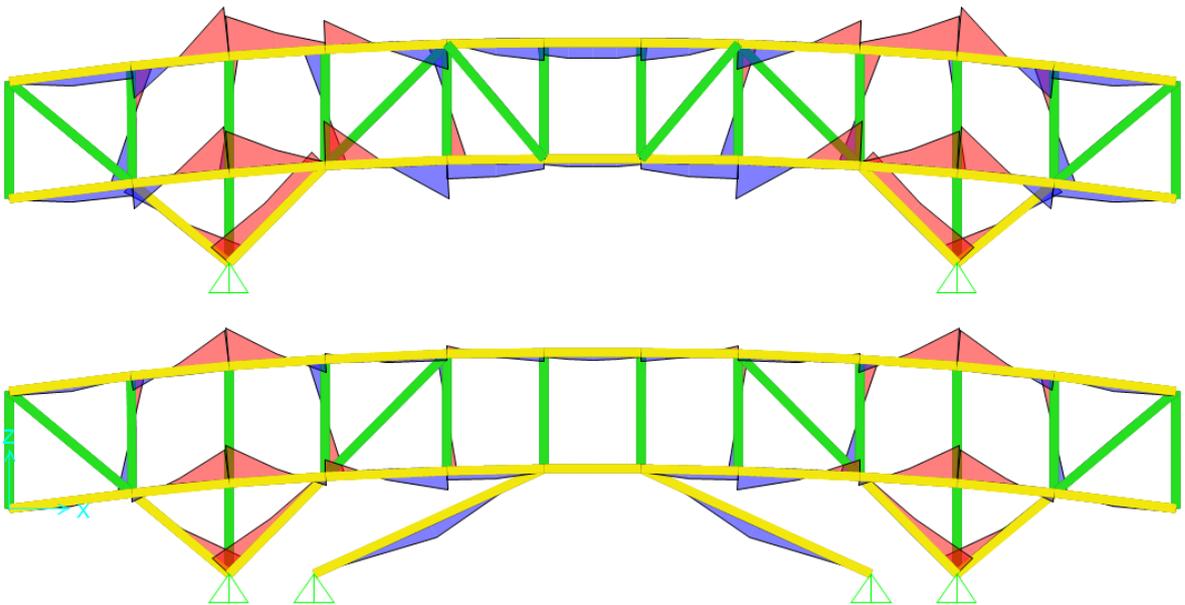


Figura 19: Momentos y Axiles de las estructuras de bambú para la combinación 5.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, hay zonas críticas en las que se ve comprometido la estabilidad de la estructura. Es justamente en estos lugares donde se va a llevar a cabo la comprobación a resistencia y a pandeo.

Las barras sometidas a mayores esfuerzos, y por tanto las limitantes, son las que se muestran en la Figura 20.

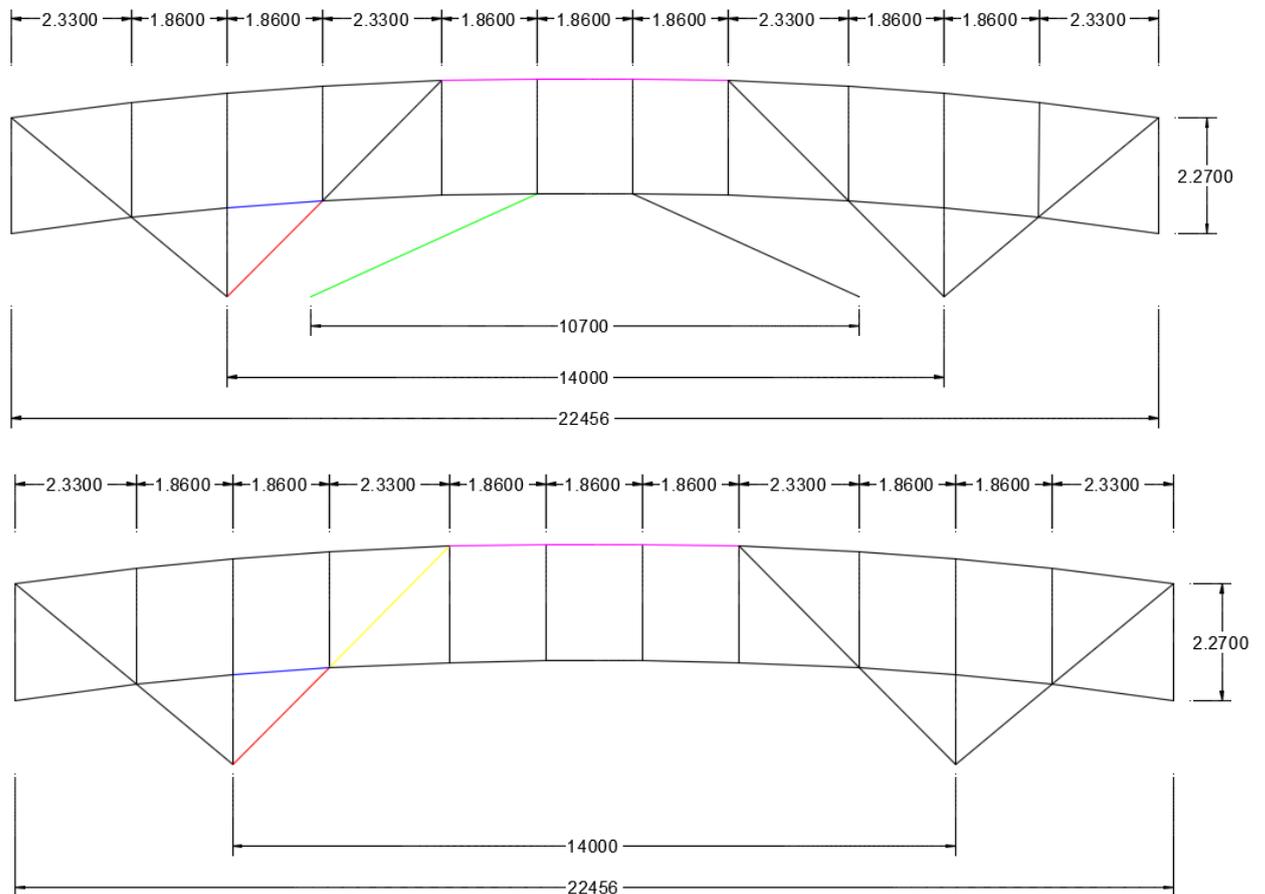


Figura 20: Selección de barras sometidas a estudio.

Las barras coloreadas son las que están sometidas a los mayores esfuerzos y por tanto, son las que se estudiarán con mayor atención. Es decir, para cada solicitación a la que están sometidas las barras y su geometría particular, se agrupan las barras según características de dimensionado común para buscar los elementos más críticos.

En la tipología 1, la barra roja será la barra APOYO, con mayores esfuerzos a flexo-compresión y mayor longitud de pandeo en comparación al arco superior. Similar comportamiento presenta la barra en verde APOYO INFERIOR. A flexotracción, el ARCO INFERIOR se observa en color azul. Por su parte, el pandeo de toda la zona central del arco superior da lugar a las barras en color lila y designación ARCO ZONA CENTRO. De igual forma, la tipología 2 añade a las denominaciones anteriores la diagonal en amarillo que da continuidad al arco superior con el apoyo: BARRA CRUZADA. Esta denominación se utilizará en el Apartado 4 (resultados) para asignar de forma rápida y sencilla los esfuerzos y los distintos índices a las barras en las tablas de resultados.

3.6 Dimensionado de las estructuras tipo.

En primer lugar se ha dimensionado la estructura según los criterios de resistencia de la estructura frente a la rotura y a continuación se ha dimensionado según el pandeo. Por último, también se ha estudiado el comportamiento de las barras frente a la deformación.

Las tres comprobaciones siguen como criterio de seguridad el método de los estados límites, pero a diferencia de las dos primeras, que se estudian según el Estado Límite Último (ELU), la deformación se estudia según el Estado Límite de Servicio (ELS). La diferencia entre ELU y ELS es que el primero, tras ser superado constituye un riesgo para las personas ya que se produce una puesta fuera de servicio de la estructura o el colapso total o parcial, mientras que el segundo si se supera, compromete el confort y el bienestar de los usuarios, puede afectar al correcto funcionamiento de la estructura y a la apariencia de la misma.

Hemos encontrado dos tipos distintos de acciones. Algunas de las barras críticas nombradas anteriormente trabajan a flexocompresión y otras a flexotracción. Es por esto, que se utilizaran expresiones distintas dependiendo de la acción a la cual se vean sometidas cada una de estas barras.

Las que se encuentran a flexo-compresión se han calculado siguiendo las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} (I_{c,0})^2 + I_{m,y} + k_m \cdot I_{m,z} &= \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 & \sigma_{c,0,d} &= \frac{N_d}{A_n} \\ (I_{c,0})^2 + k_m \cdot I_{m,y} + I_{m,z} &= \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 & \sigma_{m,y,d} &= \frac{M_{y,d}}{W_y} \\ & & \sigma_{m,z,d} &= \frac{M_{z,d}}{W_z} \end{aligned}$$

Mientras que las barras que trabajan a flexotracción han sido calculadas mediante:

$$\begin{aligned} I_{t,0} + I_{m,y} + k_m \cdot I_{m,z} &= \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 & \sigma_{t,0,d} &= \frac{N_d}{A_n} \\ I_{t,0} + k_m \cdot I_{m,y} + I_{m,z} &= \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 & \sigma_{m,y,d} &= \frac{M_{y,d}}{W_y} \quad ; \quad \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} \end{aligned}$$

Hasta este punto no es necesaria una diferenciación en el procedimiento ni en las expresiones por la diferencia de los materiales, pero a continuación, en las barras sometidas a flexocompresión, si ha sido necesaria una especificación ya que los dos materiales no se comportan de manera idéntica. Se debe a que el fenómeno conocido como pandeo, que afecta a las barras sometidas a flexocompresión, se estudia de formas distintas según la normativa utilizada para ambos materiales.

En el caso de las barras de madera, las expresiones utilizadas son las siguientes:

$$\frac{I_{c,0}}{\chi_{c,z}} + I_{m,z} + k_m \cdot I_{m,y} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{I_{c,0}}{\chi_{c,y}} + k_m \cdot I_{m,z} + I_{m,y} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z}$$

Por otro lado, para las barras de bambú se ha comprobado el pandeo siguiendo los pasos marcados por la NSR-10 que se explican a continuación.

Antes de empezar debemos conocer los valores de los esfuerzos admisibles adoptados por la norma para el bambú utilizado en la construcción de este tipo de estructuras, teniendo en cuenta las condiciones particulares de utilización, de forma análoga al tratamiento que la normativa de madera estructural realiza con las clases de servicio. De este modo, los valores de cálculo para el bambú se explicitan en las siguientes tablas.

Flexión F_b	Tracción F_t	Compresión $F_c \parallel$	Compresión $F_p \perp$	Cortante F_v
15	18	14	1.4	1.2

Módulo promedio $E_{0.5}$	Módulo percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo mínimo E_{min}
9500	7500	4000

Una vez conocidos estos datos, comenzamos con el estudio de cada barra. En primer lugar, obtenemos la esbeltez de la pieza a partir de la relación entre la longitud efectiva y el radio de giro de la sección. Bajo ningún concepto debemos utilizar barras con una esbeltez superior a 150. Con este dato comprobamos que tipología de barra tenemos para así aplicar un método de cálculo u otro.

$$\lambda = \frac{L_e}{r}$$

Barra	Esbeltez
Corta	$\lambda < 30$
Intermedia	$30 < \lambda < C_k$
Larga	$C_k < \lambda < 150$

C_k es el límite que separa las columnas medias y largas, y se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$C_k = 2.565 \sqrt{\frac{E_{0.05}}{F_c}}$$

Dependiendo de la tipología de la barra, utilizaremos las siguientes expresiones:

Cortas	Medias	Largas
$f_c = \frac{N}{A_n} \leq F_c$	$f_c = \frac{N}{A_n \left(1 - \frac{2}{5} \left[\frac{\lambda}{C_k}\right]^3\right)} \leq F_c$	$f_c = 3.3 \frac{E_{0.05}}{\lambda^2} \leq F_c$

Por último, procedemos a estudiar la viabilidad de la estructura según los criterios de deformación. Como se ha dicho anteriormente, seguiremos el método ELS. Se utilizan las combinaciones de carga en ELS, es decir, sin mayoración de las mismas.

Para el cálculo, se ha seguido el IAP del Ministerio de Fomento por el cual se fija como flecha máxima vertical para pasarelas una deformación máxima del valor frecuente de la sobrecarga ($\psi_1 = 0.4$) de L/1200. Igualmente para el caso de la deformación total se verifica L/500. Con todo esto, se utilizan las siguientes expresiones en función de si se estudian las cargas como puntuales en el tiempo, o si bien se considera la fluencia que las caracteriza. La importancia relativa de la deformación del resto de acciones variables (N,V) es muy baja en comparación a la participación de la sobrecarga como acción principal y determinante en ELS.

$$U_t = U_G + U_S$$

$$U_t = (1 + K_{def}) \cdot U_G + (1 + K_{def} \cdot \psi_1) \cdot U_S$$

* K_{def} depende de la clase de servicio, que en este caso es 2, y por tanto toma valor 0.8.

La deformación en SAP2000 viene dada por el valor U3 que aparece en la Figura 21, que indica la distancia en milímetros que ha recorrido el punto desde su estado original hasta su nueva posición tras la deformación. El valor máximo y por tanto el más restrictivo es el que se obtiene en la estructura de bambú con solo dos apoyos, más concretamente en la zona central como se puede apreciar a continuación.

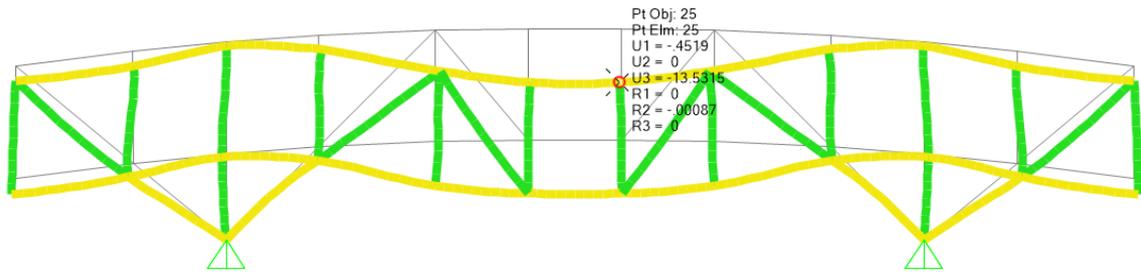


Figura 21: Deformación debida a la combinación 5 en tipología 2 bambú.

Con todas estas expresiones, y con la ayuda de una hoja de cálculo Excel, se han realizado los cálculos para cada una de las 4 opciones.

4 Resultados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras aplicar todo lo expuesto en el Apartado anterior. Se han desglosado en función de la morfología y el material teniendo así un total de 4 estructuras diferentes.

Además, las cargas con las que se han obtenido las siguientes tablas son las de la combinación más desfavorable (Combinación 5). Con esto nos aseguramos de que si la estructura es resistente y estable frente a estas cargas, lo será para el resto ya que su magnitud es menor.

4.1 Madera 1.

Comprobación ELU.

Tabla 6: Resultados Madera 1.

Madera 1				
RESISTENCIA	Arco inferior	Arco zona centro	Apoyo	Barra larga apoyo
Nombre sección	Arcos			
b (mm)	200			
h (mm)	150			
Area (mm ²)	30000			
W (mm ³)	750000			
Fc,0,k (N/mm ²)	21			
Ft,0,k (N/mm ²)	14			
Fm,k (N/mm ²)	24			
G (N/mm ²)	690			
E (N/mm ²)	7400			
Kmod (C.S. 3)	0.7			
γ	1.3			
Axil	31171	14647	91092	64646
Momentos	1069471	453953	597985	382841
Longitud	1860	5580	2650	2425
Fc,0,d (N/mm ²)	11.31			
Ft,0,d (N/mm ²)	7.54			
Fm,d (N/mm ²)	12.92			
$\sigma_{t,0,d}$ o $\sigma_{c,0,d}$	1.04	0.49	3.04	2.15
$\sigma_{m,d}$	1.43	0.61	0.80	0.51
It,0	0.14			
Ic,0		0.04	0.27	0.19
Im	0.11	0.05	0.06	0.04
I (FT)	0.25			
I (FC)		0.05	0.13	0.08
PANDEO				
iy (mm)			43.30	
iz (mm)			57.74	

λ_y	128.86	61.20	56.00
λ_z	96.65	45.90	42.00
$\lambda_{rel Y}$	1.60	1.04	0.95
$\lambda_{rel Z}$	1.20	0.78	0.71
K_y	1.92	1.11	1.02
K_z	1.31	0.85	0.79
X_y	0.34	0.66	0.73
X_z	0.54	0.84	0.87
$I_{pand. Y}$	0.24	0.47	0.30
$I_{pand. Z}$	0.15	0.36	0.25

Como se puede comprobar, en esta tipología todas las barras que están sometidas a los esfuerzos más significativos presentan la misma sección. Se trata de la sección mayor, y por tanto observamos que en términos de resistencia, la estructura trabajara en unas condiciones más que favorables y sin ningún tipo de riesgo ya que obtenemos índices bastante bajos. Si solo se tuviera en cuenta en el estudio la comprobación a resistencia, se debería de replantear la sección ya que la estructura en este caso estaría sobredimensionada.

A continuación, observamos los valores obtenidos de los índices de pandeo y comprobamos que los índices estructurales son superiores presentando valores admisibles razonablemente alejados de la unidad.

Comprobación ELS.

En esta estructura, la luz máxima se halla entre los dos apoyos centrales, separados entre sí 10.7 m. Si recordamos la expresión mencionada en el Apartado del dimensionado de las estructuras, la deformación máxima permitida por la norma es de $L/1200$. Por tanto, $10.7 / 1200 = 0.0089 \text{ m} = 8.9 \text{ mm}$.

Recurriendo al programa informático, se comprueba que la deformación está dentro de los límites admisibles.

La deformación debida a G es de 0.6 mm y la debida a S es de 1.1 mm. Por tanto, estudiado como una acción puntual en el tiempo, la deformación total sería de 1.7 mm, cifra muy inferior a los 8.9 mm que se establecían como límite.

Si se tiene en cuenta el valor de combinación y la fluencia que le pertocan a las cargas, el valor varia quedando una deformación total de 2.53 mm, que sigue estando por debajo del umbral estipulado por la norma. Aunque se tomara el 100% de deformación de la sobrecarga y no su valor frecuente como refleja el IAP-11, la comprobación seguiría siendo satisfactoria a largo plazo.

4.2 Madera 2.

Comprobación ELU.

Tabla 7: Resultados Madera 2.

Madera 2				
RESISTENCIA	Arco superior	Arco zona centro	Apoyo	Barra cruzada
Nombre sección		Arcos		Resto
b (mm)		200		150
h (mm)		150		150
Area (mm ²)		30000		22500
W (mm ³)		750000		562500
Fc,0,k (N/mm ²)		21		
Ft,0,k (N/mm ²)		14		
Fm,k (N/mm ²)		24		
G (N/mm ²)		690		
E (N/mm ²)		7400		
Kmod (C.S. 3)		0.7		
γ		1.3		
Axil (N)	29317	61308	129043	81873
Momentos (N mm)	1069471	441383	643268	137894
Longitud (mm)	1860	5580	2650	3320
Fc,0,d (N/mm ²)		11.31		
Ft,0,d (N/mm ²)		7.54		
Fm,d (N/mm ²)		12.92		
$\sigma_{t,0,d}$ o $\sigma_{c,0,d}$	0.98	2.04	4.30	3.64
$\sigma_{m,d}$	1.43	0.59	0.86	0.25
It,0	0.13			
Ic,0		0.18	0.38	0.32
Im	0.11	0.05	0.07	0.02
I (FT)	0.24			
I (FC)		0.08	0.21	0.12
PANDEO				
iy (mm)		43.30		43.30
iz (mm)		57.74		43.30
λ_y		128.86	61.20	76.67
λ_z		96.65	45.90	76.67
$\lambda_{rel Y}$		1.60	1.04	1.30
$\lambda_{rel Z}$		1.20	0.78	1.30
Ky		1.92	1.11	1.45
Kz		1.31	0.85	1.45
Xy		0.34	0.66	0.48
Xz		0.54	0.84	0.48
I _{pand. Y}		0.85	0.64	0.69
I _{pand. Z}		0.53	0.50	0.68

En esta segunda tipología de madera en la que se eliminan dos de los apoyos comprobamos que, como era de esperar, los esfuerzos a los que se encuentran sometidos las barras críticas se han visto incrementados pero sigue satisfaciéndose la comprobación estructural con los mismos perfiles que en la tipología 1 en madera.

Las zonas más afectadas tras esta modificación son la zona central de la pasarela, ya que queda suspendida sobre una luz mayor, y los apoyos, ya que la distribución de las cargas se concentra en dos únicos puntos. Todo esto se hace visible en la Figura 22, en la que se muestran los Axiles sobre la estructura.

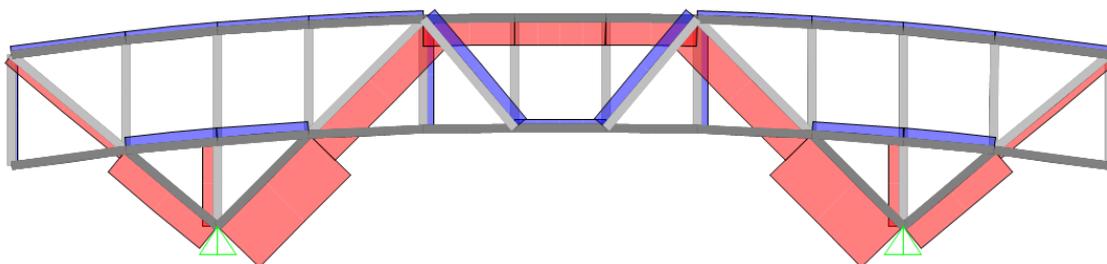


Figura 22: Axiles en tipología 2 Madera.

Los índices de resistencia siguen siendo muy buenos aunque se han incrementado notablemente en comparación con el caso anterior. Los índices de pandeo, de la misma forma, también se han visto incrementados y presentan unos valores aceptables pero que no deberían de aumentar más en el caso de la barra cruzada o diagonal de la pasarela. Esta diagonal, recibe gran parte de la carga compresión que transmite el arco superior y lo canaliza hacia la zona del apoyo en esta tipología, al ser de la misma sección que el resto de diagonales de la triangulación, y mayor longitud se observa como los coeficientes de reducción del pandeo en ambos planos reducen la resistencia de la barra a compresión a la mitad.

Comprobación ELS.

En este caso, al variar la morfología de la estructura también lo hace la luz. Ahora se trabaja con una luz de 14 m. En este nuevo caso, la deformación máxima permitida será de $14 / 1200 = 0.0117 \text{ m} = 11.7 \text{ mm}$. De igual forma que en la estructura anterior, se procede a comprobar la deformación de las dos maneras posibles.

Por el primer método, la suma de la deformación debida a G y la debida a S es de 1 mm y 1.9 mm respectivamente. Esto da una deformación total de 2.9 mm.

Por el método en el cual se considera la fluencia, aplicando la fórmula descrita anteriormente, se obtiene un valor total de 4.31 mm. Ambos valores se mantienen por debajo de la deformación límite que establece la norma y por tanto la estructura es viable considerándose igualmente una restricción total con toda la acción de la carga variable de $L/1200$.

4.3 Bambú 1.

Comprobación ELU.

Tabla 8: Resultados Bambú 1.

Bambú 1				
RESISTENCIA	Arco inferior	Arco zona centro	Apoyo	Barra larga apoyo
Nombre sección	Arcos		Resto	
Diámetro (mm)	140		100	
Espesor (mm)	15		12	
Área (mm ²)	13194.69		7539.82	
Inercia	32326988.41		9424777.96	
Momento resistente	461814.12		188495.56	
Radio Giro	49.50		35.36	
Axil (N)	31738	13565	90441	65312
Momentos (N mm)	713394	179223	422495	328505
Longitud (m)	1860	5580	2650	48511
F _{c,0,d} (N/mm ²)			14	
F _{t,0,d} (N/mm ²)			18	
F _{m,d} (N/mm ²)			15	
σ _{t,0,d} o σ _{c,0,d}	2.41	1.03	6.85	4.95
σ _{m,d}	1.54	0.39	0.91	0.71
I _{t,0}	0.13			
I _{c,0}		0.07	0.49	0.35
I _m	0.10	0.03	0.06	0.05
I (FT)	0.24			
I (FC)		0.03	0.30	0.17
PANDEO				
L		5580	2650	4850
λ		112.73	53.54	97.98
Clasificación de las barras		Cortas	λ < 30	
		Intermedias	30 < λ < 59	
		Largas	59 < λ < 150	
>14		1.95	9.78	2.58
I _p		0.17	0.99	0.36

Para este primer caso del bambú se puede comprobar que los índices en la resistencia son mayores que los obtenidos en la estructura análoga de madera. La utilización de una sección compuesta por dos culmos en todas las barras permite concebir una disposición simétrica en los encuentros de las mismas pero en contraposición, las propiedades geométricas de las secciones resultantes son inferiores a las obtenidas en madera y ello redundará en índices resistentes superiores aunque la resistencia propia del bambú es superior.

En cuanto a la comprobación a pandeo, utilizando el método recomendado por la NSR-10 para estructuras de bambú, vemos que tampoco hay problema con ninguna de las barras críticas, aunque se observa la gran penalización que esta norma aplica a las barras en función de su esbeltez.

Comprobación ELS.

En el caso del bambú, debido a que la morfología es la misma, también lo será el valor límite de deformación. Para esta tipología es de 8.9 mm.

Se procede de idéntica manera que en los dos casos anteriores y por el primer método se obtiene un valor de 1.5 mm para G y 3 mm para S, sumando un total de 4.5 mm. Para el segundo método, aplicamos de nuevo la expresión del Apartado 3.6 y se obtiene un valor total de 6.66 mm.

Como se puede comprobar los valores han aumentado debido a las características del material, que es más flexible. De todos modos, pese a que la deformación sea mayor, los valores siguen estando dentro del rango de valores admisibles. En el caso de no utilizar el valor frecuente de la sobrecarga, la estructura verificaría la comprobación de deformación (L/1200) prácticamente en el límite (8.9).

4.4 Bambú 2.

Comprobación ELU.

Tabla 9: Resultados Bambú 2.

Bambú 2				
RESISTENCIA	Arco inferior	Arco zona centro	Apoyo	Barra larga cruce
Nombre sección	Arcos		Resto	
Diámetro (mm)	140		100	
Espesor (mm)	15		12	
Área (mm ²)	13194.69		7539.82	
Inercia	32326988.41		9424777.96	
Momento resistente	461814.12		188495.56	
Radio Giro	49.50		35.36	
Axil (N)	30414	60914	128723	80916
Momentos (N mm)	794717	350823	442894	98060
Longitud (m)	1860	5580	2650	3317
F _{c,0,d} (N/mm ²)			14	
F _{t,0,d} (N/mm ²)			18	
F _{m,d} (N/mm ²)			15	
σ _{t,0,d} o σ _{c,0,d}	2.31	4.62	9.76	10.73
σ _{m,d}	1.72	0.76	0.96	0.52
l _{t,0}	0.13			
l _{c,0}		0.33	0.70	0.77
l _m	0.11	0.05	0.06	0.03
I (FT)	0.24			

I (FC)	0.16	0.55	0.62
PANDEO			
L (mm)	5580	2650	3317
λ	112.73	53.54	67.01
Clasificación de las barras	Cortas	$\lambda < 30$	
	Intermedias	$30 < \lambda < 59$	
	Largas	$59 < \lambda < 150$	
>14	1.95	13.91	5.51
l_p	0.3	1.54	1.01

De la misma forma que ha sucedido con la estructura anterior de bambú, en esta segunda los índices en resistencia también son mayores. En este caso debido a la propia naturaleza de las barras y del material como hemos comentado anteriormente, y por la misma morfología de la estructura, que si bien recordamos, tiene dos apoyos menos que la estructura original.

En cuanto al pandeo, se observa que hay barras que no entran dentro de los límites. Mientras que en la tipología 2 de madera, al quitar los apoyos centrales la estructura ha seguido resistiendo, en el caso del bambú, no ha sido así debido a la rigidez del material y a la esbeltez de las barras.

Comprobación ELS.

De igual manera que en la tipología 2 de madera, la luz en la tipología 2 de bambú será de 14 m dando una deformación máxima admisible de 11.7 mm.

Se repite la misma operación y se obtienen dos resultados. Para el caso en el que no tenemos en cuenta la fluencia se suman los 2.7 mm pertenecientes a la deformación generada por G y los 5.7 mm debidos a la carga S obteniéndose un total de 8.4 mm.

Por el método en que se tiene en cuenta la fluencia, se obtiene un valor de deformación de 12.38 mm. En este caso nos encontramos por encima del valor límite que recomienda la norma (11.7 mm en este caso) y por tanto esta estructura no cumpliría los requisitos según ELS. Si no se considera el valor frecuente de combinación de la sobrecarga (0.4), el valor obtenido será mayor, alejándose todavía más del valor límite.

5 Conclusiones

Gracias a toda la información recopilada y los datos obtenidos mediante el cálculo de las estructuras, podemos concluir el trabajo con los siguientes puntos:

1. Queda latente que el bambú es un material con gran potencial, tanto en las aplicaciones estructurales que se conocen en la actualidad como para el futuro desarrollo de nuevas soluciones técnicas.
2. Debido a sus características como especie (velocidad de crecimiento, rectitud, crecimiento a nivel global, absorción de carbono, etc.) es un recurso forestal de gran valor que interesa potenciar para, entre muchas otras razones, aliviar la carga que sufren gran parte de las especies arbóreas maderables y ayudar a frenar la deforestación de las grandes masas selváticas.
3. En cuanto a lo referente a su uso estrictamente estructural, el establecimiento de normativas específicas para su uso y aplicación ha contribuido de forma determinante. De esta forma, es posible que las estructuras con este material se realicen siguiendo unos criterios unificados que garanticen la buena realización de la obra y la seguridad tras haberse terminado.
4. Observando los resultados del Apartado 4 se puede comprobar que el bambú es un excelente material ya que las estructuras que han sido viables en madera también lo han sido en bambú, pese al incremento de los índices de comprobación de resistencia. Sin embargo, en la comprobación a pandeo sale penalizado debido a su propia naturaleza. La tipología 1 cumple frente a todas las exigencias, pero sin embargo la tipología 2, al suprimirse los apoyos centrales, no lo hace. El bambú es un material que puede llegar a ser hasta dos veces más resistente que la madera, pero carece de rigidez que lo sustente adecuadamente. Es capaz de curvarse mucho hasta llegar al punto de rotura y esto hace que en ocasiones se deba recurrir a piezas de longitudes menores o aumentar el número de apoyos para evitar este fenómeno, como ha quedado de manifiesto el dimensionado de la tipología 1 de bambú respecto a la 2.
5. Los resultados del dimensionado de las estructuras de madera han resultado plenamente satisfactorios con una calidad de madera de conífera que es inferior a su homóloga en lo que sería la comparativa clásica del bambú con una madera de frondosa.
6. En cuanto a las tipologías en bambú, las secciones establecidas no permiten su utilización en las dos tipologías propuestas. Sin entrar en profundidad en la materialización de los nudos de estas pasarelas, el diseño preliminar ha buscado utilizar secciones compuestas de dos culmos para facilitar el encuentro entre barras. A partir de los resultados obtenidos, y no cumplir las exigencias resistentes, se observa que preferentemente, la tipología 2 en bambú tendría que diseñarse con secciones de

cuatro culmos que por la propia simetría también facilita la ejecución de los encuentros entre barras.

7. En cuanto al peso total de las estructuras (Anejo 2), se observa claramente que, para la misma tipología de estructura, la realizada en bambú pesa menos que la de madera, pese a que la densidad del bambú es cercana al doble de la densidad de la madera utilizada. Esto se debe a la reducción del área material. El bambú presenta mejores prestaciones mecánicas que la madera frente a la que se ha comparado. Esto suple la diferencia de área resistente entre ambos ya que el área en las barras de bambú es sustancialmente menor que la de madera. Esta gran ventaja hace que las estructuras en bambú sean adecuadas para lugares que no pueden sustentar grandes pesos y a los que no puede acceder maquinaria pesada.
8. De igual modo que sucedió con la madera antes de que se estudiaran e investigaran mejores soluciones técnicas (laminados, microlaminados, etc.), las estructuras de bambú que se encuentran en la actualidad están realizadas con culmos sin transformar. Esto está empezando a cambiar debido a los avances en la investigación con este material. Ya se consiguen laminados de bambú y otros productos transformados que ayudan a solucionar los problemas que presenta el rollizo. En cuanto a su comportamiento estructural, por su propia anatomía, el bambú es muy flexible, y es por ello que se utiliza en estructuras preparadas para resistir seísmos ya que absorbe de manera muy eficiente las vibraciones evitando así el colapso de la estructura.

6 Bibliografía.

Bibliografía citada.

- PLATAFORMA ARQUITECTURA (2013). Arquitectura en bambú: La obra de Simón Vélez. Visto el 3 de Julio de 2015. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-265878/arquitectura-en-bambu-la-obra-de-simon-velez>
- GIOVANNA BARBARO (1997). *La biónica del bambú*. Tesis. Università IUAV di Venezia.
- LOPEZ, L.F.; CORREAL, J.F. (2013). Exploratory study of the glued laminated bamboo *Guadua angustifolia* as a structural material. *Maderas. Ciencia y tecnología* 2009; 11(3): 171-182.
- NAVAS GUTIERREZ, ELVIRA (2011). *Aplicaciones estructurales de la guadua (Guadua angustifolia kunth). Proyecto de estructura modular multifuncional en Colombia*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Charpentier Salazar, G. (2013). El bambú como material de construcción. Boletín del Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos. ProNAP Año 7 n° 39. [http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinProNAP7\(39\).pdf](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinProNAP7(39).pdf)
- Pereza, J. Enrique (1997). El bambú como material de construcción. AITIM. N°185.
- Alvarez Castilla, J. (2012). *Comportamiento mecánico de las conexiones en los elementos de bambú para estructuras ligeras. El caso de las especies del trópico de Veracruz*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- AMERICAN BAMBOO SOCIETY. Bamboo Species Source List. Visto el 16 de Julio de 2015. <http://bamboo.org/BambooSourceList/index.php>
- Rodríguez Alonso, Cesar A.; Morales Díaz, Estefan (2008). *El bambú como material estructural. Análisis de un caso práctico*. Universidad de Girona.
- NSR-10 (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Título G – Estructuras de madera y guadua. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Faculty of Architecture–RWTH Aachen. Bambus. Jörg Stamm (2002). Visto el 13 de Julio de 2015. <http://bambus.rwth-aachen.de/eng/index.html>
- Guzman, David (2005). Connections and slab for bamboo constructions. The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 27-29 September 2005.
- Trujillo, David (2007). 'Bamboo Structures in Colombia'. *The Structural Engineer* 85 (6),25-30. <http://www.istructe.org/webtest/files/8b/8b5ef091-84ca-49c7-a451-d7b0ecb5f6b8.pdf>
- CTE SE-M (2009). Código Técnico. Documento Básico de Seguridad Estructural. Madera. Ministerio de Fomento.
- CTE SE-AE (2009). Código Técnico. Documento Básico de Seguridad Estructural. Acciones en la edificación. Ministerio de Fomento.

-IAP-11 (2012). Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento.

Bibliografía complementaria.

- SCHWANER, KURT (2004). *Puentes de madera*. Ed. AITIM. 290 pp.

- AGÜLLES, RAMÓN; ARRIAGA, F. (2013). *Estructuras de madera. Bases de cálculo*. Ed. AITIM. 570 pp.

-PEREIRA, MARCO ANTONIO; BARATA, TOMAS QUEIROZ (2014). *Bamboo as a sustainable material used in design and civil construction: species, management, characterization and applications*. Key Engineering Materials. Vol 634 (2015). pp 339-350.

-BHAVNA, SHARMA; GATOO, ANA; BLOCK, MAXIMILIAN; RAMAGE, MICHAEL (2014). *Engineered bamboo for structural applications*. Construction and Building Materials. Vol 81 (2015). pp 63-73.

-HIDALGO LOPEZ, O. (1981). *Manual de construcción con bambú*. Ed. Estudios Técnicos Colombianos Ltda. 71 pp.

-CLAVER GUTIERREZ ALIAGA, SERGIO (2010). *Uniones estructurales con bambú*. Tesis. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú.

Bibliografía de imágenes por orden de aparición.

<http://www.dossierdearquitectura.com/noticia.php?id=1137>

<http://www.abc.es/viajar/20130418/abci-barajas-terminal-premios-201304181603.html>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Bambusoideae>

<http://bambusa.es/bambu-caracteristicas/bambu-guadua/>

<http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/9/76/2749>

<https://4puntoscardinalesdotcom.files.wordpress.com/2013/02/cabancc83a.jpg>

http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2013/02/07/article-0-17665C08000005DC-162_306x459.jpg

<http://www.bambumex.org/ArquitecturayBambuJorge%20Stamm.pdf>

http://images.adsttc.com/media/images/51ae/2aa7/b3fc/4bf3/fc00/008d/medium_jpg/V%C3%ADa_LaPatria.com.jpg?1431798552

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/18/COLLECTIE_TROPENMUSEUM_Brug_van_bamboe_over_de_Kali_Serayu_bij_Wonosobo_TMnr_10026487.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arquitectura_con_bamb%C3%BA.JPG

http://bambus.rwth-aachen.de/eng/reports/joerg_stamm/referat/coquiyo.JPG

http://bambus.rwth-aachen.de/eng/reports/joerg_stamm/referat/statik.JPG