



César Fernandes · Juan José Fontana  
Pablo Laurino · Virginia Casañas  
Virginia Vila

# Estructuras livianas

Como respuesta a programas  
temporales diseñadas con  
materiales sustentables

Fernandes · Fontana · Laurino · Laurino · Casañas · Vila Estructuras livianas



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY



CSIC

bibliotecaplural





# Estructuras livianas

*Como respuesta a programas temporales  
diseñadas con materiales sustentables*

La presente publicación se basa en la investigación “Estructuras livianas como respuesta a programas temporales diseñadas con materiales sustentables”, financiada a través del llamado interno a Proyectos de investigación de Facultad de Arquitectura, edición 2007.

Equipo de investigación:

Ing. César Fernandes

Arq. Juan José Fontana

Arq. Pablo Laurino

Mg. Arq. Virginia Casañas

Arq. Virginia Vila

La publicación de este libro fue realizada en el marco del Programa de Apoyo a Publicaciones 2011 de la Comisión Sectorial de Investigación Científica–CSIC de la Universidad de la República.

El trabajo que se presenta fue seleccionado por el Comité de Referato de Publicaciones creado por Resolución del Consejo de la Facultad de Arquitectura de fecha 23 de junio de 2010, e integrado por los arquitectos William Rey, Rosana Sommaruga, Marcelo Danza y Mercedes Medina.

© César Fernandes, Juan José Fontana, Pablo Laurino, Virginia Casañas, Virginia Vila, 2012

© Universidad de la República, 2012

Departamento de Publicaciones, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR)

18 de Julio 1824, Montevideo, Uruguay C.P.: 11200

Tel. (+598) 2408 5714 – (+598) 2408 2906

[www.universidadur.edu.uy/bibliotecas/dpto\\_publicaciones.htm](http://www.universidadur.edu.uy/bibliotecas/dpto_publicaciones.htm)

[infoed@edic.edu.uy](mailto:infoed@edic.edu.uy)

ISBN:

César Fernandes · Juan José Fontana  
Pablo Laurino · Virginia Casañas  
Virginia Vila

## Estructuras livianas

*Como respuesta a programas temporales  
diseñadas con materiales sustentables*

**Universidad de la República**

Dr. Rodrigo Arocena

Rector

**Facultad de Arquitectura**

Dr. Arq. Gustavo Scheps

Decano

**Consejo de Facultad de Arquitectura**

Orden docente:

Marcelo Payssé

Rafael Cortazzo

Fernando Rischewski

Jorge Nudelman

Marcelo Danza

Orden Estudiantes:

María José Milans

Marcelo Martinotti

Luciano Carreño

Orden egresados:

Gricelda Barrios

Néstor Pereira

Guillermo Rey

**IC Instituto de la Construcción**

Arq. Duilio Amándola

Director Ejecutivo

# ÍNDICE

---

1. SÍNTESIS.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
3. MÉTODO .....	15
4. MARCO CONCEPTUAL .....	17
Ligereza, resistencia y economía en los materiales estructurales.....	17
Elección de los materiales a estudiar.....	19
5. CARACTERÍSTICAS DE LA CAÑA TACUARA URUGUAYA.....	21
Propiedades de la <i>guadua angustifolia</i> .....	22
Propiedades mecánicas de la <i>guadua chacoensis</i> .....	30
Modelo de cubierta de doble curvatura en caña tacuara.....	40
Modelo de cubierta en caña nacional ensayado.....	44
6. CARACTERÍSTICAS DE LOS TUBOS DE CARTÓN DE SECCIÓN CILÍNDRICA .....	51
La arquitectura de Shigeru Ban.....	51
Características básicas de comportamiento de los tubos de papel .....	52
7. ALGUNAS PROPUESTAS DE ESTRUCTURAS TEMPORALES.....	61
Refugio colectivo con estructura de tubos de cartón y cubierta de doble curvatura en caña nacional.....	64
Recinto cubierto con núcleo central aporticado de tubos de cartón.....	68
Prototipo de estructura liviana temporal stands de exposiciones.....	71
8. CONCLUSIONES .....	73
9. BIBLIOGRAFÍA .....	75



## Colección Biblioteca Plural

La universidad promueve la investigación en todas las áreas del conocimiento. Esa investigación constituye una dimensión relevante de la creación cultural, un componente insoslayable de la enseñanza superior, un aporte potencialmente fundamental para la mejora de la calidad de vida individual y colectiva.

La enseñanza universitaria se define como educación en un ambiente de creación. Estudien con espíritu de investigación: ése es uno de los mejores consejos que los profesores podemos darles a los estudiantes, sobre todo si se refleja en nuestra labor docente cotidiana. Aprender es ante todo desarrollar las capacidades para resolver problemas, usando el conocimiento existente, adaptándolo y aun transformándolo. Para eso hay que estudiar en profundidad, cuestionando sin temor pero con rigor, sin olvidar que la transformación del saber sólo tiene lugar cuando la crítica va acompañada de nuevas propuestas. Eso es lo propio de la investigación. Por eso la mayor revolución en la larga historia de la universidad fue la que se definió por el propósito de vincular enseñanza e investigación.

Dicha revolución no sólo abrió caminos nuevos para la enseñanza activa sino que convirtió a las universidades en sedes mayores de la investigación, pues en ellas se multiplican los encuentros de investigadores eruditos y fogueados con jóvenes estudiosos e iconoclastas. Esa conjunción, tan conflictiva como creativa, signa la expansión de todas las áreas del conocimiento. Las capacidades para comprender y transformar el mundo suelen conocer avances mayores en los terrenos de encuentro entre disciplinas diferentes. Ello realiza el papel en la investigación de la universidad, cuando es capaz de promover tanto la generación de conocimientos en todas las áreas como la colaboración creativa por encima de fronteras disciplinarias.

Así entendida, la investigación universitaria puede colaborar grandemente a otra revolución, por la que mucho se ha hecho pero que aún está lejos de triunfar: la que vincule estrechamente enseñanza, investigación y uso socialmente valioso del conocimiento, con atención prioritaria a los problemas de los sectores más postergados.

La Universidad de la República promueve la investigación en el conjunto de las tecnologías, las ciencias, las humanidades y las artes. Contribuye así a la creación de cultura; ésta se manifiesta en la vocación por conocer, hacer y expresarse de maneras nuevas y variadas, cultivando a la vez la originalidad, la tenacidad y el respeto a la diversidad; ello caracteriza a la investigación —a la mejor investigación— que es pues una de las grandes manifestaciones de la creatividad humana.

Investigación de creciente calidad en todos los campos, ligada a la expansión de la cultura, la mejora de la enseñanza y el uso socialmente útil del conocimiento: todo ello exige pluralismo. Bien escogido está el título de la colección a la que este libro hace su aporte.

La universidad pública debe practicar una sistemática Rendición Social de Cuentas acerca de cómo usa sus recursos, para qué y con cuáles resultados. ¿Qué investiga y qué publica la Universidad de la República? Una de las varias respuestas la constituye la Colección Biblioteca Plural de la CSIC.

Rodrigo Arocena



### Síntesis

Este trabajo está basado en el informe final de la investigación *Estructuras livianas como respuesta a programas temporales, diseñadas con materiales sustentables*, realizada por los autores entre febrero y diciembre de 2008 con financiación de la Facultad de Arquitectura de la Udelar.

La investigación, por definiciones iniciales metodológicas, se proyectó desde la arquitectura y hacia la arquitectura, atravesando los materiales y los procedimientos constructivos, desde los antecedentes teóricos y prácticos hacia el diseño. El estudio refirió, por lo tanto, a una temática abierta y ello llevó a recorrer caminos que unas veces estuvieron determinados por definiciones de método y otras por razones intuitivas y hasta aleatorias.

Esta investigación, que consideramos más como una plataforma de lanzamiento de distintas líneas de investigación futuras que como un cuerpo de conocimiento acabado, da cuenta sintética de este proceso y de los aprendizajes realizados. En particular muestra la factibilidad de realizar estructuras ligeras con caña tacuara nacional e investiga la posibilidad de usar tubos de cartón en forma de pantallas cilíndricas. Pero más allá de ello, el estudio realizado revela una amplia gama de posibilidades de generar arquitectura, fundamentalmente para programas no permanentes y con gran flexibilidad de traslado y montaje. Consideramos en particular su posible aplicación para estructuras itinerantes y de emergencia.



### Objetivos

Nos proponemos demostrar la viabilidad de construir estructuras con materiales no usados habitualmente en nuestro medio, para programas temporales. Para ello investigamos las características de un número acotado de materiales y planteamos el desarrollo de procedimientos constructivos asociados a dichos materiales, en un marco limitado, suficiente para la demostración del primer objetivo mencionado. Los conceptos de eficiencia estructural y la sustentabilidad presidieron la búsqueda.



### Método

La eficiencia estructural, como concepto, es usada con la visión simple de su equivalencia a la ligereza estructural, sin definiciones cuantificables

No se definió en los objetivos el estudio específico de la sustentabilidad de los sistemas constructivos trabajados, pero este concepto, que merecería un análisis exhaustivo para su aplicación concreta a los sistemas constructivos propuestos, estuvo presente desde la búsqueda primaria de los materiales a investigar.

En síntesis, el estudio no pretende dar una respuesta a los problemas clásicos sobre el concepto de sustentabilidad, sino abrir posibles caminos a recorrer y plantear alternativas viables en la búsqueda de estas respuestas.

Se pensó así en materiales que podrían considerarse sustentables para nuestro medio, ya sea por sus características intrínsecas (el caso de la caña tacuara nacional) o por ser desechados en otras actividades (envases de plástico, tubos de cartón, etc.).

Optamos entonces por investigar diseños de cubiertas ligeras de doble curvatura realizadas con trozos de caña tacuara nacional y elegimos un material que habíamos considerado desde el inicio dentro del conjunto de materiales plausibles de ser considerados como estructurales: los tubos de cartón, priorizando el análisis de su posible asociación en láminas de simple curvatura, trabajando como pantallas portantes.

Estos dos temas centraron el estudio durante buena parte de la investigación. Analizamos en cada caso el material, la unidad funcional estructural y la adecuación de la modelización teórica con el comportamiento real.

El estudio de las características de estos dos materiales y los antecedentes sobre eficiencia estructural (nos referimos a «ligereza, resistencia y economía en el uso de los materiales de las estructuras») formaron entonces el trípode esencial de la búsqueda realizada.

No descartamos el estudio de otros materiales, pero su análisis se vio rezagado ante los tres temas considerados como principales. Recurrimos a algunos de ellos para la resolución constructiva de algunos detalles en los diseños propuestos (madera, cajones plásticos, etc.).

El entrelazamiento del estudio de materiales, los ensayos realizados y los antecedentes analizados, se cruzaron con las búsquedas de diseño y exigieron finalmente la definición de un sistema constructivo para cada caso.

Realizamos una serie de ensayos en el Laboratorio del Instituto de la Construcción de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República, con el objetivo de evaluar la eficiencia estructural de la caña tacuara uruguaya y los tubos de cartón encontrados como desechos en nuestro medio.

Por otra parte, se sometió a ensayo un prototipo de cubierta de doble curvatura de cañas, que surgió en la búsqueda de diseños.

Se modelizó teóricamente el comportamiento de esta unidad funcional y se ajustó este modelo abstracto al real medido en el laboratorio.

## Ensayos realizados:

### Caña tacuara uruguaya:

- ensayos de compresión simple sobre probetas en prensa.
- ensayos de cañas en flexión simple, con evaluación de la deformación en relación a la carga.
- ensayos carga-deformación, de unidad funcional estructural de cubierta en doble curvatura, realizado con elementos de caña.

### Tubos de cartón:

- ensayos de compresión simple, sobre probetas, en prensa.
- ensayos de tubos de cartón en flexión simple, con evaluación de la deformación en relación a la carga.

Desde el punto de vista del procesamiento de los datos de laboratorio, se priorizó la diversidad más que la cantidad y diseño de las muestras, en consonancia con los objetivos definidos.

Aunque en algunos de los ensayos realizados el número de resultados permite definir intervalos de confianza precisos, el diseño de las muestras no ha sido dirigido a ello.

Consideramos altamente significativos los estudios realizados desde el punto de vista cualitativo y por ende los consideramos representativos desde el punto de vista descriptivo, fieles al objetivo perseguido.

# Marco conceptual

## Ligereza, resistencia y economía en los materiales estructurales

Dadas las cualidades de ligereza, resistencia y economía de las estructuras, compuestas por barras longitudinales comprimidas o traccionadas y articuladas en sus extremos o entrelazadas formando superficies curvas o alabeadas, éstas se presentan como idóneas para su aplicación en programas temporales o itinerantes y para la rápida solución de espacios habitables en situaciones de emergencia, sin necesidad de la intervención de mano de obra especializada en su proceso de montaje.

Por otra parte, en el origen de nuestra tradición arquitectónica encontramos numerosos ejemplos de utilización de elementos naturales en construcciones que hasta hoy perduran. En el período colonial los tipos estructurales se basaban mayormente en materiales como troncos de palmeras, adobe, paja, ladrillos y piedra, que eran fácilmente obtenidos del territorio y constituían un recurso inagotable, al menos a la escala de su explotación y se incorporaban a la obra con un mínimo de transformaciones. Con el transcurso del tiempo, la renovación técnica (promovida por la llegada de nuevas tecnologías incorporadas por los inmigrantes y posteriormente por el fenómeno de la globalización) se ha ido traduciendo en un gradual abandono de esos materiales a favor de otros que no son, generalmente, económica y materialmente sustentables, como por ejemplo el acero, utilizado en estructuras de este material o como componente del hormigón armado. Pero existen muchos otros materiales, más difundidos en la industria de la construcción, que también pueden llegar a ser escasos o que eventualmente provocan una creciente acumulación de desechos no reutilizables o cuyo proceso productivo requiere de un consumo energético excesivo o genera productos secundarios perjudiciales para el medio ambiente, si no se evalúa responsablemente y hasta el fin, su aprovechamiento posible o el tratamiento de esos desechos.

El presente trabajo pretende retomar esa postura original que recurre a elementos naturales o a elementos residuales de la industria, no utilizados en general en la construcción, con un mínimo de transformación para generar estructuras transitorias que en su concepción lleven implícita la necesidad de ser en su mayor parte reutilizables, dando respuesta a problemas que, por su urgencia o por su carácter efímero, necesitan ajustarse a un presupuesto reducido.

Para ello se plantearon una serie de lineamientos básicos:

- La utilización de materiales naturales o la reutilización de productos o subproductos de otras actividades que en un principio no encuentran un destino específico.
- La liviandad de los tipos estructurales a elegir, que junto a la simplicidad de montaje de sus elementos básicos, modulados y estudiados en su comportamiento aislado, serán idóneos para su aplicación en estructuras de uso temporal.
- Una filosofía estructural que se enmarque en las investigaciones que han realizado personalidades como el Arq. Richard Buckminster Fuller sobre geometría energética, o cómo aprovechar al máximo cada material y sacar lo máximo de lo mínimo; el Ing. Robert Le Ricolais asimilando enseñanzas provenientes de la biología, la topología, la geometría y la cristalografía para el diseño de sus estructuras experimentales; el Arq. Shigeru Ban sobre estructuras de cartón y papel enteramente reciclables y en la historia de nuestra arquitectura con el Arq. Julio Vilamajó, quien exploró las posibilidades de materiales autóctonos en el entorno de la modernidad, tratando de elevarlos respecto de su uso original hasta un nivel acorde a su contemporaneidad y sin perder de vista la tradición local; o los Ings. Eladio Dieste y Leonel Viera, quienes trataron de obtener el máximo aprovechamiento de materiales con una impronta tradicional, combinándolos con audacia e ingenio, llevando al límite sus posibilidades económicas y siendo respetuosos de la necesidad de la comunidad de extremar el cuidado de sus recursos.

El ingeniero francés Robert Le Ricolais fue un pionero en el estudio de la rigidez de estructuras de barras tridimensionales: «Las formas naturales son más eficientes desde el punto de vista mecánico que las construidas por el hombre», decía y dedicó su vida a la observación de lo que denominó «prodigios naturales», como los radiolarios o los cristales minerales. Un modelo geométrico resulta de una determinada acción mecánica. Analizando la estructura de varias especies de radiolarios se centrará en la idea de separación de dos grandes zonas estructurales: un núcleo comprimido compuesto por redes trianguladas en el espacio y una membrana externa en tracción, viendo allí no un modelo formal a seguir sino un modelo de organización de la materia en el espacio.

Richard Buckminster Fuller inventó el *domo geodésico* como aplicación de sus ideas sobre geometría energética que había desarrollado durante la segunda guerra mundial y como ensayo sobre el problema de la escasez de vivienda. La esfera es la forma geométrica que encierra el mayor volumen posible con una determinada superficie o con una determinada cantidad de material. Los domos de Fuller eran estructuras superficiales en forma de casquete esférico compuestos por una malla triangulada que era capaz de responder en conjunto frente a una fuerza actuante en cualquiera de sus nodos. La economía espacial de la forma esférica, la rigidez de la malla tri-direccional y el poco tiempo que requería su montaje, hizo de este tipo de estructuras uno de

los más fuertes, livianos y eficientes sistemas constructivos de su tiempo. El pabellón de Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal en 1967, su obra más reconocida, estaba compuesto por unidades estructurales tridimensionales conformadas por triángulos exteriores conectados con hexágonos interiores que, dispuestos en forma esférica, distribuían el peso de toda la estructura canalizándola en diferentes direcciones a lo largo de toda la superficie. Sus investigaciones sobre sistemas de construcción de viviendas basados en la tecnología y en la racionalización de los procedimientos constructivos continuaron y llegaron a desarrollar varios prototipos de casas Dymaxion, como la *Wichita House*, realizada a escala real en el año 1946 en Kansas. La *Wichita House* era un prototipo de vivienda suspendida de un mástil central de unos siete metros de altura que alojaba las áreas de servicio, construida enteramente en plástico y aluminio reciclado de chatarra de naves y aeroplanos de la posguerra. Fuller creía que la única solución para brindar viviendas dignas a toda la población era producirlas industrialmente en grandes cantidades, lo cual implicaba transportes, tanto de materias primas como de productos finales, por lo que el peso era uno de los principales factores a tener en cuenta. Si la estructura trabajaba fundamentalmente a tracción y no a compresión, el peso total se reducía en forma sustancial.

## Elección de materiales a estudiar

Dadas las pautas fijadas en el marco conceptual respecto de la utilización de materiales que cumplan con los conceptos enumerados, se impone la necesidad de realizar una primera selección.

En una sociedad de fuerte consumo, como marca la tendencia económica actual, en la que aún no se han establecido o se encuentran en una etapa temprana de implementación algunas normas básicas de reutilización o disposición final de desperdicios, se impone el estudio de su potencial aprovechamiento como materia prima en distintas industrias. Esto no solo es importante por el ahorro mismo de materia prima y de energía utilizada en su fabricación, sino también por la necesidad de generar y mantener condiciones medioambientales aceptables, reduciendo agentes contaminantes y volúmenes de material de descarte.

Teniendo en cuenta este concepto elegimos una serie de materiales que actualmente se descartan y que creemos presentan potencialidad para ser usados como materiales estructurales. Por ejemplo, los envases de madera de algunos materiales o maquinaria empaquetados conocidos como *pallets*, utilizados muchas veces como material en construcciones informales o como combustible. Si formaran parte de un sistema estudiado, estos elementos podrían ser de gran valor y coinciden plenamente con las características enumeradas en el presente trabajo. También hemos considerado los elementos de plástico o pvc utilizados con este mismo fin o como contenedores de mercancías y cajones de diversos tamaños, como los empleados en el transporte de botellas. Los

propios envases plásticos de bebidas descartables son elementos que también han demostrado, a partir del ingenio popular, tener propiedades potenciales que son dignas de ser aprovechadas. Los tubos de cartón utilizados como envases de rollos de papel o de tela poseen características que coinciden plenamente con los preceptos de partida y han sido ya utilizados en diversas construcciones por el arquitecto japonés Shigeru Ban, quien ha demostrado esas potencialidades.

En cuanto a materiales naturales pensamos en la caña tacuara nacional, en el barro, tanto a granel como formando bloques o ladrillos, en el adobe y en los puntales de eucaliptus utilizados como parte de construcciones transitorias de apoyo a la obra.

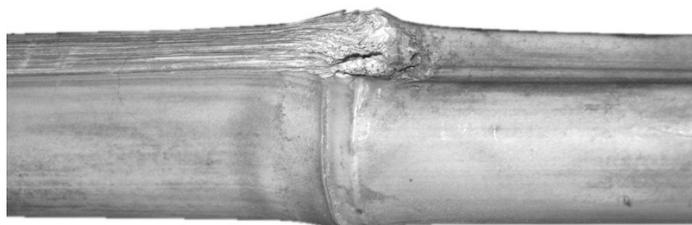
Decidimos estudiar en profundidad dos materiales de esta lista: la caña tacuara nacional y los tubos de cartón.

### Características de la caña tacuara uruguaya

Entre los diversos géneros y especies de caña habituales en nuestro país, nos interesó por sus características físicas particulares la *bambusa tuldooides*, tacuara o caña tacuara.

Esta especie suele alcanzar entre 6 y 10 metros de altura y entre 2 y 5 centímetros de diámetro, es de corteza lisa y de color verde oscuro que se torna amarillento en ejemplares adultos. Sus entrenudos miden entre 25 y 40 cm de longitud y tiene ramillas que llevan de 4 a 6 hojas en su extremidad. Las hojas son lanceoladas, agudas, largas, de 10 a 20 cm de largo por 1 a 2 cm de ancho.

*Bambusa tuldooides* o *guadua pallescens*, *mambusa Pallescens*<sup>1</sup>. En adelante nos referiremos a ella con la denominación simple de tacuara, entendiendo por ello la *bambusa tuldooides*.



Guadua, *Guadua angustifolia*

La más estudiada en América es la *guadua angustifolia* o *takuarasú*, muy común en Colombia y Venezuela. Las mejores condiciones para el desarrollo de esta especie se dan en climas más cálidos que el nuestro (en climas templados pueden crecer pero con menores tamaños), alcanzando diámetros del culmo de hasta 25 cm. Son las cañas americanas de mayor tamaño y, en **nuestra hipótesis primaria de trabajo**, presentan un comportamiento similar al de las tacuaras. Esta especie ha sido ampliamente estudiada por académicos colombianos y usaremos esos resultados a modo comparativo.

La *guadua chacoensis* es una especie endémica en Paraguay, norte argentino y sur-oeste brasileño y ha sido estudiada en trabajos académicos paraguayos y usaremos esos resultados a modo comparativo.

#### *Guadua angustifolia*

---

1 Atilio Lombardo, Los árboles cultivados en los paseos públicos.

Utilizamos toda la información disponible correspondiente a la *guadua angustifolia*, que es abundante. Lo hacemos porque reconocemos en estos estudios la descripción del comportamiento de la mayoría de sus variedades. Obviamente los valores concretos no son equiparables de una variedad a otra, ni siquiera lo son dentro de la misma variedad cuando cambian las condiciones de su desarrollo (por efecto del clima o el suelo). Por ello esta amplia información es un acercamiento al conocimiento del comportamiento del material en los más diversos aspectos.

Sintetizamos las características mecánicas de la *guadua angustifolia* a partir de ensayos realizados en Colombia. Tomamos de estos estudios las conclusiones globales de comportamiento y los valores medios como índices primarios. En vista del objetivo definido, al referirnos a sus características, no distinguiremos el origen particular de cada muestra.

## Propiedades de la *guadua angustifolia*

Usamos dos series de análisis colombianos:

- a) 128 Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte. 20: 125-133, 2006  
Luis Edgar Moreno Montoya, Lina Rocío Osorio Serna y Efraín Eduardo Trujillo De los Ríos. El ensayo de tensión se realizó bajo la norma NTC-959 en el Laboratorio de Calidad Textil del SENA, Medellín, Colombia.
- b) Caori Patricia Takeuchi Tam, Ing. Civil, César Emilio González, Ing. Civil y Master en Estructuras Colombia. Aporte de equipo de investigación en madera del Instituto de la Construcción de la Facultad de Arquitectura de la UdelaR a través de contacto con la Universidad de Chile.

### Serie (a)

En el culmo se distinguen tres tercios: basal, medio y apical, cuyos diámetros promedio son respectivamente: 11.5, 11.05 y 5.84 cm —para censo colombiano—. La sección transversal del culmo presenta tres componentes típicos muy bien diferenciados en cuanto a la anatomía: la epidermis o corteza exterior, la capa interior de la pared del tallo y el área fibro-vascular, esta última está localizada entre las dos anteriores y allí aparecen células parenquimáticas que constituyen el tejido del tallo, los haces vasculares como tejido conductivo y las fibras.

Las fibras constituyen el tejido que soporta todo el esfuerzo mecánico al que está sometido el tallo debido al viento y otros factores externos, además de su propio peso. Las fibras del bambú en general se caracterizan por su forma delgada, ahusada en ambos lados y en algunos casos bifurcada en los extremos. Se encuentran en los internodos rodeando a los haces vasculares y constituyen entre el 40 y el 50% del tejido total y entre el 60% y el 70% del peso total del culmo. La estructura interna de la fibra es única, posee paredes interiores alternadas en capas gruesas y delgadas con diferente

orientación. A esta estructura, que no existe en fibras de madera común, se le denomina estructura polilaminar y aparece especialmente en las fibras ubicadas en la periferia del culmo. El número de capas alternadas o laminadas varía de fibra a fibra. En general, puede decirse que estas paredes alternadas conducen a que el culmo tenga una excelente resistencia.

### Ensayo de tracción simple

El ensayo de tracción se realizó bajo la norma NTC-959 en el Laboratorio de Calidad Textil del SENA, Medellín, Colombia, utilizando un dinamómetro digital Lloyd para medir la carga máxima y elongación máxima en el momento de rotura. Cada haz de fibra fue sometido a una carga de tracción a una velocidad de rompimiento de 80 milímetros por minuto hasta su ruptura total, y en ese momento se mide la carga y deformación máxima. El área de la sección transversal se calculó a partir de la densidad aparente (1.4 g/cm<sup>3</sup>), la masa y la longitud de los haces de fibra. Se obtuvo por este medio porque la sección transversal de los haces de fibra de guadua no presenta una geometría regular.

**Tabla C 1:** Matriz de factores y niveles utilizados en los ensayos a tracción de los haces de fibra de *guadua angustifolia*.

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Edad del culmo	Joven (de uno a tres años)	Maduro (de tres a seis años)	Sobremaduro (seis años en adelante)
Altura del culmo	Primer tercio	Segundo tercio	Tercer tercio
Espesor de pared	Haces de fibra externos (15.2% del espesor del tallo)	Haces de fibras medios (73.9% del espesor del tallo)	Haces de fibras internos (10.8% del espesor del tallo)

El esfuerzo máximo a la tensión de los haces de fibra de guadua angustifolia se calculó a partir de la ecuación:  $\sigma = \frac{P}{A}$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo o resistencia máxima en MPa, P es la carga máxima en N y A es el área en m<sup>2</sup>.

Dado que la gráfica de carga en función de la deformación mostró una tendencia lineal, se asumió que el material presentaba un comportamiento frágil, por lo tanto para calcular el módulo de elasticidad se utilizó la ecuación:  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

donde E es el módulo de elasticidad en GPa,  $\sigma$  es la fuerza máxima y  $\varepsilon$  es la deformación unitaria.

## Resultados y discusión

### *Resistencia a la tracción:*

En la tabla 2 se presentan los valores promedio de resistencia máxima a la tensión, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación de los haces de fibra de *guadua angustifolia* en función de la ubicación y la edad del culmo. No se tuvo en cuenta la resistencia de las fibras en función de la altura del culmo, dado que desde el punto de vista estadístico no se presentaron diferencias significativas.

**Tabla C 2.** Valores promedio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *guadua angustifolia* en función de la posición en el culmo y la edad.

		Tercio del culmo	Valor promedio resistencia a la tracción (Mpa)	Valor promedio módulo de elasticidad (Gpa)	Valor promedio porcentaje de elongación
Rango de edad	G. joven	Fibras exteriores	534	27,05	2,0
		Fibras intermedias	769	27,44	2,8
		Fibras internas	661	26,24	2,5
	G. madura	Fibras exteriores	578	29,20	2,0
		Fibras intermedias	706	25,67	2,7
		Fibras internas	708	25,61	2,8
	G. sobremadura	Fibras exteriores	512	25,08	2,1
		Fibras intermedias	665	26,77	2,4
		Fibras internas	652	26,40	2,5

Resulta evidente que los haces de fibras exteriores, sin importar el rango de edad, son los que presentan menor resistencia a la tensión, incluso con valores por debajo del promedio total del experimento. Los haces de fibra internos presentaron valores de resistencia superiores al valor promedio, mientras que los haces de fibra intermedios registraron en general el mejor comportamiento. Se puede apreciar que la mayor resistencia a la tensión la presentan los haces de fibra de guadas jóvenes extraídos de la parte media de la pared. Esta propiedad va disminuyendo a medida que aumenta la edad del tallo.

## Estudio de las propiedades de haces de fibra de *guadua angustifolia*

Los haces de fibra exteriores del culmo presentan un valor superior en las guaduas maduras, mientras que presentan los menores valores en las guaduas sobremaduras. Los haces de fibra internos e intermedios presentan los módulos más altos en las guaduas jóvenes y sobremaduras. Sin embargo, no hay diferencias significativas entre los niveles de los factores edad y grosor de pared, lo que permite afirmar que se pueden obtener valores de módulo de elasticidad estadísticamente similares de fibras extraídas de cualquier parte de la pared del tallo en cualquier rango de edad de la guadua.

Para los haces de fibra de *guadua angustifolia*, el porcentaje de elongación promedio se estableció en 2.4%, la desviación estándar y el coeficiente de variación fueron de 0.73 y 13.5% respectivamente.

Este porcentaje demuestra que se trata de un material poco dúctil, que se deforma muy poco antes de fallar. Se observa que los haces de fibras exteriores, que registran en promedio los mayores valores, presentan un comportamiento inverso respecto a los ubicados en la parte intermedia de la pared. Mientras que en los primeros el porcentaje de elongación aumenta levemente con la edad, los segundos muestran una tendencia negativa. En general el porcentaje de elongación no presentó diferencias significativas para los niveles establecidos.

### Conclusiones parciales

Por medio del ensayo de tracción se logró la caracterización de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *guadua angustifolia*. Los valores obtenidos, especialmente en la resistencia a la tracción, presentan una apreciable variabilidad, así como los datos recopilados de otras fuentes para otras fibras naturales. Este fenómeno era de esperarse, ya que se trata de un material orgánico cuya resistencia se puede ver afectada por factores tales como condiciones de crecimiento, proceso de extracción y aspectos climatológicos, entre otros. Los haces de fibra intermedios presentaron la mayor resistencia a la tracción promedio para los tres rangos de edad, siendo los haces intermedios de guaduas jóvenes los que ofrecen mayor resistencia a la tracción.

Los haces de fibra más rígidos resultaron ser los exteriores de las guaduas maduras y éstos, a su vez, presentaron el menor porcentaje de elongación, lo cual resulta coherente. El bajo porcentaje de elongación promedio de los haces de fibra demuestra que se trata de un material frágil y, por tanto, sus características se asimilan a las de la mayoría de los materiales de refuerzo para materiales compuestos.

Basados en los resultados de este estudio, el valor de resistencia a la tensión de los haces de fibra de *guadua angustifolia* es competitivo con la resistencia de algunas de las principales fibras naturales utilizadas actualmente como refuerzo. En teoría, este material se vislumbra como una excelente alternativa para sustituir fibras naturales y aun sintéticas en aplicaciones en las cuales criterios como el costo, reciclabilidad, peso y resistencia específica son relevantes.

## Serie (b)

Ensayos a compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad en la compresión paralela a la fibra según norma ISO 22157 y según ensayos realizados en la Universidad de Bogotá entre enero y junio de 2007. (Normas: Int. Est. 2004, e ISO N315, 1999.)

Para encontrar los valores de resistencia última y de esfuerzos admisibles, así como para evaluar los resultados, se calculó la media y la desviación estándar y el valor correspondiente al límite de exclusión del 5%.

Posteriormente, se calculó el valor característico de la norma ISO 22156, según la siguiente ecuación:

$$\sigma_k = \sigma_{0,05} \left( 1 - \frac{2,7 \times \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right)$$

Tabla C 3. Resistencia a compresión paralela a la fibra de la <i>guadua angustifolia</i> para diferentes procedencias (MPa).					
Parámetro	Finca				
	Bambusal	Nápoles	Los Ángeles	Playa Rica	Total
Número de muestras	222	225	160	202	809
$\sigma_{\text{mínimo}}$	29.45	34.00	30.11	33.86	29.45
$\sigma_{\text{máximo}}$	82.23	92.27	81.74	118.79	118.79
$\sigma_{\text{medio}}$	58.52	59.43	56.29	51.57	56.21
Desviación Estándar	10.89	8.63	10.40	8.63	10.16
$\sigma_k$	37.76	44.42	39.14	39.86	40.42

**Tabla C 4.** Resistencia a compresión paralela a la fibra de la *guadua angustifolia* para diferentes localizaciones en la altura del culmo (MPa).

Parámetro	Localización en el culmo			
	Cepas	Basas	Sobrebasas	Total
Número de muestras	190	336	283	809
$\sigma_{\text{mínimo}}$	29.45	31.68	36.31	29.45
$\sigma_{\text{máximo}}$	92.60	82.27	118.79	118.79
$\sigma_{\text{medio}}$	50.63	56.42	59.70	56.21
Desviación Estándar	9.03	9.35	10.21	10.16
$\sigma_k$	35.38	42.61	43.35	40.42

**Tabla C 5.** Influencias por fisuras durante el secado en la resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua Angustifolia* para diferentes localizaciones en la altura del culmo (MPa).

Parámetro	Localización en el culmo							
	Cepas		Basas		Sobrebasas		Total	
	Con fisura	Sin fisura	Con fisura	Sin fisura	Con fisura	Sin fisura	Con fisura	Sin fisura
Número de muestras	51	139	97	239	44	239	192	617
$\sigma_{\text{mínimo}}$	30.91	29.45	31.68	33.03	44.43	36.31	30.91	29.45
$\sigma_{\text{máximo}}$	70.69	92.60	82.23	79.78	73.71	118.79	82.23	118.79
$\sigma_{\text{medio}}$	50.95	50.51	56.75	56.26	59.72	59.70	55.89	56.31
Desviación estándar	9.40	8.92	11.22	8.50	8.48	10.51	10.63	10.02

Los resultados indican que la resistencia a compresión no varía esencialmente cuando se presentan fisuras durante el secado de la guadua al medio ambiente.

**Tabla C 6.** Influencias por la presencia de nudos en la resistencia a compresión paralela a la fibra de la *guadua angustifolia* para diferentes localizaciones en la altura del culmo (MPa).

Parámetro	Localización en el culmo							
	Cepas		Basas		Sobrebajas		Total	
	Con nudos	Sin nudos	Con nudos	Sin nudos	Con nudos	Sin nudos	Con nudos	Sin nudos
Número de muestras	135	55	154	182	82	201	371	438
$\sigma_{\text{mínimo}}$	29.45	33.14	34.42	31.68	38.74	36.31	29.45	31.68
$\sigma_{\text{máximo}}$	70.69	92.60	78.03	82.23	118.79	81.74	118.79	92.60
$\sigma_{\text{medio}}$	50.11	51.89	56.02	56.75	58.12	60.35	54.34	57.79
Desviación Estándar	8.64	9.88	9.12	9.56	12.38	9.13	10.29	9.79

Los resultados indican la no influencia en el aumento de la resistencia a la compresión en el nudo. En los resultados de nuestros ensayos en el Laboratorio del IC se observará una disminución moderada de dicha resistencia en las probetas con nudos.

Damos a continuación los resultados sintetizados de los ensayos colombianos referidos, correspondientes al módulo de elasticidad para ensayos a compresión paralela a las fibras.

**Tabla C 7.** Módulo de elasticidad de la *guadua angustifolia* para diferentes procedencias (MPa).

Parámetro	Finca				
	Bambusal	Nápoles	Los Ángeles	Playa Rica	Total
Número de muestras	146	118	88	127	479
$E_{\text{mínimo}}$	9434	9517	4242	6878	4242
$E_{\text{máximo}}$	33479	27556	49551	146336	146336
$E_{\text{medio}}$	19519	18532	15531	16662	17859
Desviación Estándar	4163	3216	5679	12425	7528

Se observa una gran dispersión en la muestra, en referencia a la localización geográfica y a los valores máximos, medios y mínimos.

**Tabla C 8.** Módulo de elasticidad de la *guadua angustifolia* para diferentes localizaciones en la altura del culmo (MPa).

Parámetro	Localización en el culmo			
	Cepas	Basas	Sobrebasas	Total
Número de muestras	150	267	62	479
$E_{\text{mínimo}}$	4242	6570	10327	4242
$E_{\text{máximo}}$	146336	33479	40637	146336
$E_{\text{medio}}$	17418	18130	17757	17859
Desviación Estándar	11929	4187	4377	7528

Se observa una gran dispersión de la muestra. El módulo aumenta notoriamente con la altura de localización en el culmo.

En sólo 15% de los casos —para tres especímenes—, el módulo de elasticidad encontrado al utilizar deformímetros mecánicos en lugar de los eléctricos fue mayor. (Reiteramos la fuente: *Caori Patricia Takeuchi Tam, Ing. Civil, César Emilio González, Ing. Civil y Master en Estructuras.*)

Adjuntamos tabla con valores medios, producto de las series de ensayos presentadas. Estos valores medios tienen exclusivamente valor indicativo para nuestra realidad.

**Tabla C 9.** Síntesis de valores medios con valor exclusivamente indicativo:

Resistencia a la tracción paralela a la fibra	640 MPa
Resistencia a la compresión paralela a la fibra	56 MPa
Módulo de deformación: tracción paralela a la fibra	$E_t = 26600$ MPa
Módulo de deformación: compresión paralela a la fibra	$E_c = 17859$ MPa

Los valores de ensayos a tracción paralela a la fibra surgen de ensayos fibra a fibra, sin considerar el comportamiento global conjunto de todas las fibras integradas en la caña.

## Propiedades mecánicas de la *guadua chacoensis*

Se usó para los ensayos la norma ISO/DIS 22156 y normativa paraguaya para madera.

Tabla C 10. Compresión paralela a l fibra, tensión de rotura y módulo de elasticidad.				
	Módulo de elasticidad medio (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad percentil 5 (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensión de rotura media (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensión de rotura percentil 5 (kg/cm <sup>2</sup> )
Flexión	215791	109566	732	379
Compresión	26248	7609	640	526

La densidad media resultó 868 kg/m<sup>3</sup>.

## Ensayos realizados en el laboratorio del Instituto de la Construcción (IC) sobre propiedades mecánicas de la caña tacuara uruguaya

Presentamos a continuación los resultados de los ensayos realizados por el equipo de investigación en el Laboratorio del IC de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República. Se utilizó la norma referida para los ensayos colombianos de forma de facilitar la comparación de valores.

Los ensayos de compresión paralela a la fibra fueron realizados con un número limitado de probetas. Se tomó como longitud de la probeta el doble del diámetro máximo medido en las secciones de la misma. Las características de estos ensayos se basaron en la norma UNIT ISO 22157 -I *Bamboo—Determination of physical and mechanical properties*.

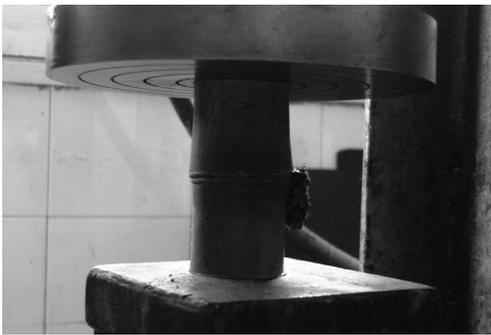


Tabla C 11. Ensayo de la tacuara uruguaya en compresión paralela a la fibra.					
	Identificación de probetas.	$\phi$ Externo Medio (cm)	$\phi$ Interno Medio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Tensión de rotura (kg/cm <sup>2</sup> )
1	1.1	3.803	2.973	4.4165	480.3
2	1.2	3.800	2.975	4.3899	563.8
3	1.3	3.743	2.808	4.8100	514.6
4	2.1	3.458	2.753	3.4385	582.7
5	2.2	3.483	2.803	3.3566	597.0
6	2.3	3.423	2.688	3.5271	534.6
7	3.1	2.985	2.378	2.5586	552.8
8	3.2	2.980	2.415	2.3940	590.8
9	3.3	3.058	2.275	3.2772	503.5
10	4.1	3.878	2.978	4.8455	535.1
11	4.2	3.925	2.993	5.0663	511.8
12	4.3	3.903	2.888	5.4129	435.5
13	5.1	3.078	2.260	3.4270	550.3
Se descarta	5.2	3.145	2.356	3.4126	-----
14	5.3	3.148	2.338	3.4894	506.6
Media		$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n}$			533
Desviación Estándar		$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}}$			43

Debe considerarse que el número de cañas ensayadas es menor que el número de probetas, lo que debe haber incidido favorablemente para obtener tan baja dispersión de valores.

En la tabla anterior se integraron probetas con nudos y sin nudos, atendiendo a la experiencia colombiana que indicaba que los nudos no modificaban el comportamiento.

**Tabla C 12.** Ensayo de la tacuara uruguaya en compresión paralela a la fibra, tensión en rotura con y sin nudo en las probetas (Kg/cm<sup>2</sup>).

Media	$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n}$	
Todas las probetas	Solo probetas con nudos	Solo probetas sin nudos
533	499	55 <sup>2</sup>

Los valores sugieren una pequeña disminución de la resistencia en el caso de las probetas con nudo, lo que contradice los resultados colombianos. Continuaremos, sin embargo, manejando la muestra completa sin distinguir probetas con y sin nudos.

Obtenemos una estimación del percentil 5:

$$\sigma_{0,05} \approx \bar{x} - 2 \times s = 533 - 2 \times 43 = 447$$

$$\sigma_k = \sigma_{0,05} \left( 1 - \frac{2.7 \times \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right) = 447 \left| 1 - \frac{2.7 \times \frac{43}{533}}{\sqrt{14}} \right| = 421$$

**Tabla C 13.** Comparativo de los valores de las tres especies estudiadas.

Tensión de rotura en compresión paralela a la fibra (MPa)			
	$\sigma_{\text{medio}}$	$\sigma_k$	Desviación Estándar s
Guadua Angustifolia	56.2	40.4	10.2
Tacuara Uruguaya	53.3	42.1	4.3
Guadua Chacoensis	64.0	47.3	-----

Tal como se ha señalado, los valores característicos obtenidos en el laboratorio tienen un valor meramente descriptivo, debiéndose elaborar a futuro un estudio estadístico de los mismos que permita su aplicación.

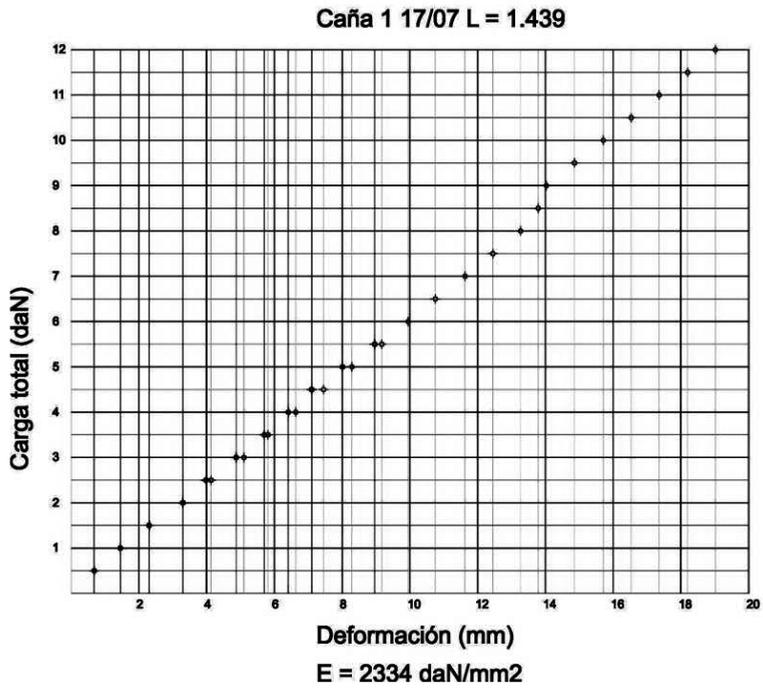
## Hipótesis de comportamiento de la Tacuara Uruguaya

Se concluye la similitud de comportamiento de las especies en cuestión. Extrapolamos una serie de propiedades generales de comportamiento que consideramos similares para las diversas especies.

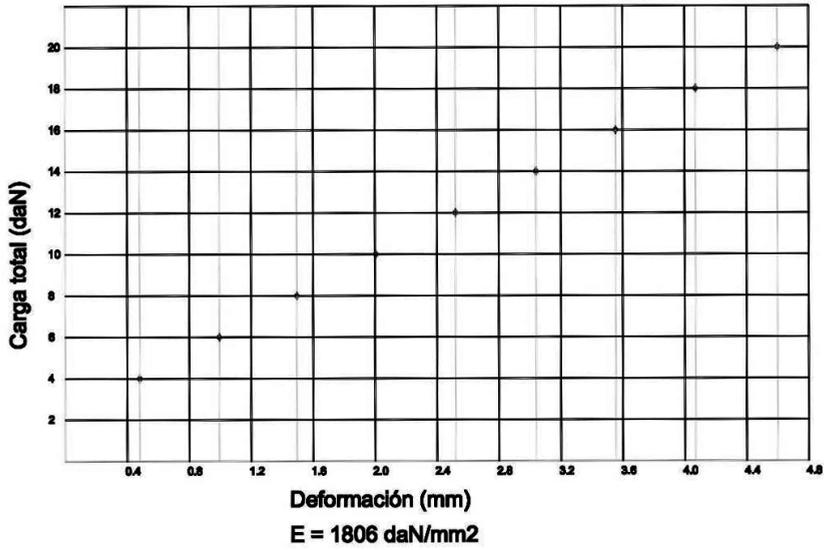
En virtud de todo ello concluimos, en el marco de definición de hipótesis, las siguientes propiedades para la Tacuara Uruguaya:

- Sus propiedades estructurales son buenas, mejor aun que las de maderas como el pino y el eucalipto.
- Las probetas con nudos arrojaron valores levemente inferiores en cuanto a su capacidad resistente en la compresión paralela a la fibra.
- La presencia de fisuras por secado no debe producir alteraciones significativas en las propiedades mecánicas.
- Densidad estimada (en acuerdo con los valores paraguayos)  $860 \text{ kg/m}^3$ .
- El contenido de humedad promedio estará de acuerdo con el punto de equilibrio higroscópico aproximado de nuestro país (16%). El culmo superior (sobrebajas) es el que posee menor porcentaje de humedad y el inferior (cepas) es el que contiene mayor porcentaje de humedad.
- Es indispensable considerar en el diseño la protección de la estructura de caña tacuara frente a agentes atmosféricos y bacteriológicos.

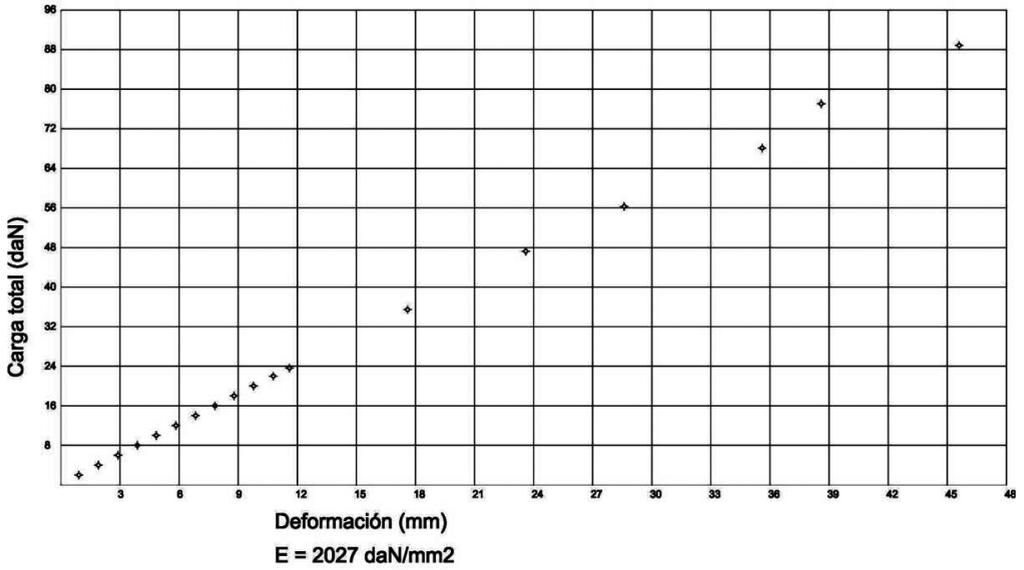
# Gráficas de módulo de elasticidad a partir de los ensayos en flexión



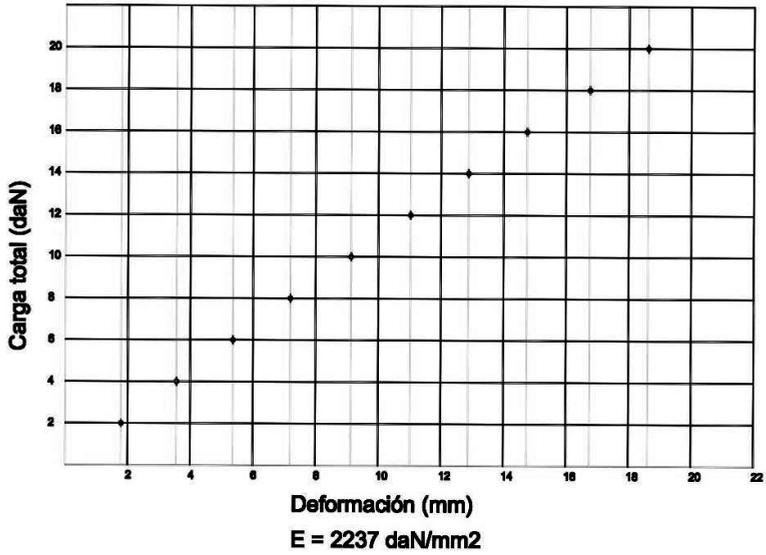
**Caña 2 15/08 L = 1.070**



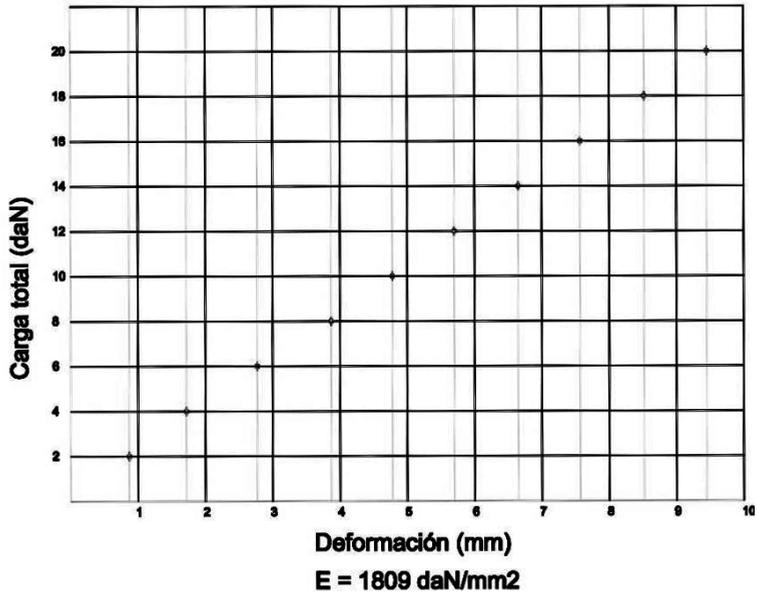
**Caña 3 06/08 L = 1.75**



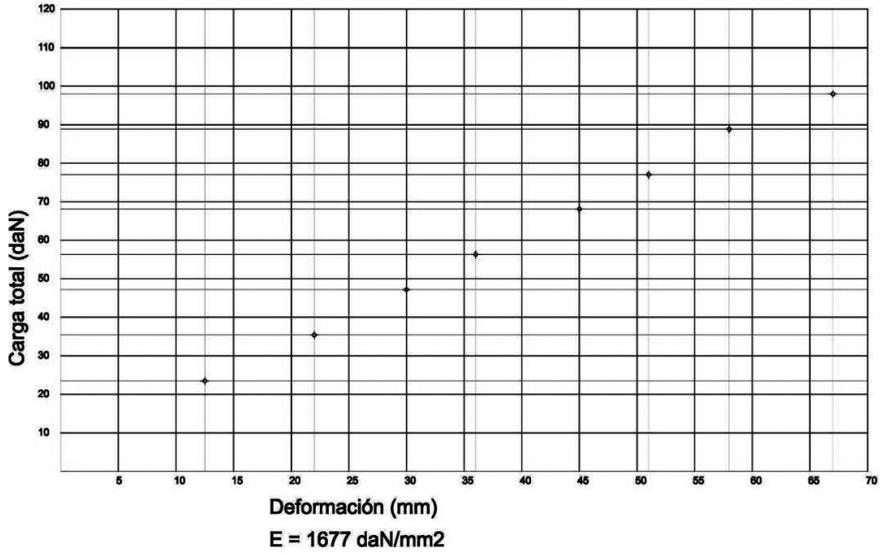
**Caña 5 15/08 L = 1.000**



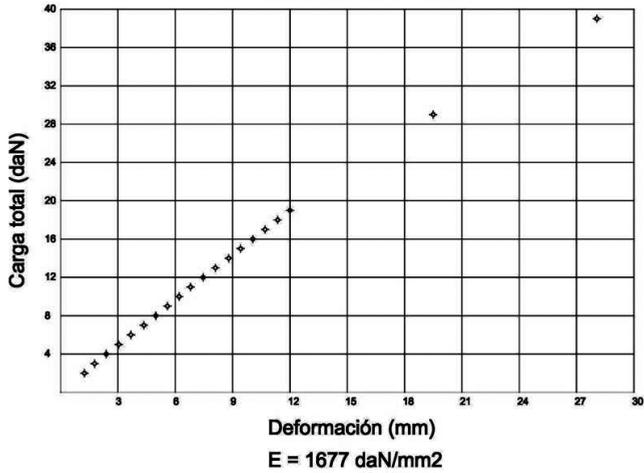
**Caña 10 15/08 L = 995**



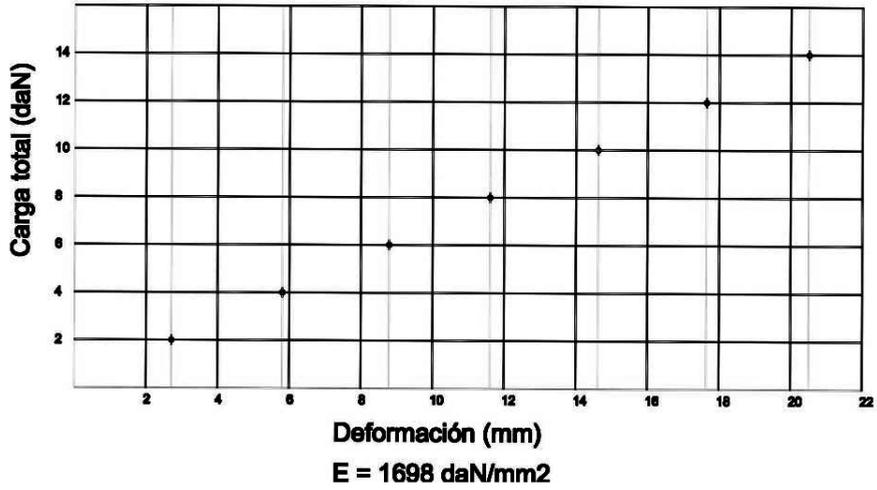
Caña 11 06/08 L = 1.800



Caña 11 22/7 L = 1.80



**Caña 12 15/08 L = 1.000**



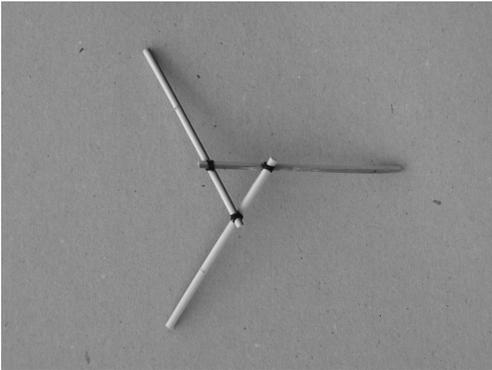
Cuadro de valores síntesis de nuestros ensayos, que concuerdan con los resultados de los estudios académicos a que nos hemos referido antes.

Tabla C 14. Tensión de rotura en compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad (daN/cm<sup>2</sup>)

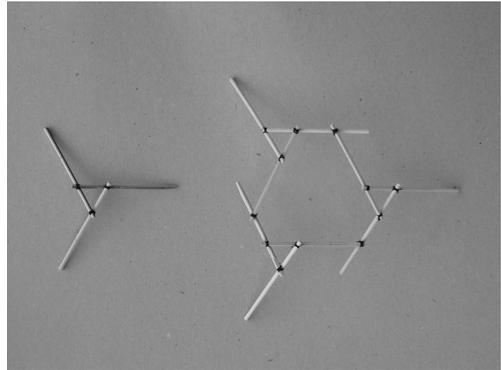
			Módulo de elasticidad
Tacuara Uruguaya	53	42	190.800

## Modelo de cubierta de doble curvatura en caña tacuara

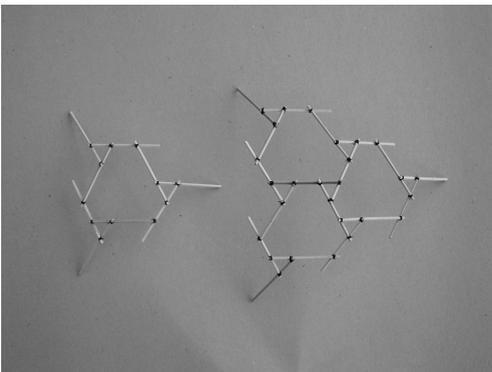
A partir de los resultados obtenidos del estudio de probetas modélicas de caña tacuara, estudiamos una unidad estructural posible. Se la elige a través de una búsqueda de diferentes formas de conexión de trozos de caña, de forma de generar superficies con doble curvatura. Con cierta arbitrariedad y en función de los tiempos y recursos disponibles, se elige el modelo a estudiar, elección fuertemente influida por aspectos constructivos y por la intención de diseño de superficies de doble curvatura para cubiertas livianas.



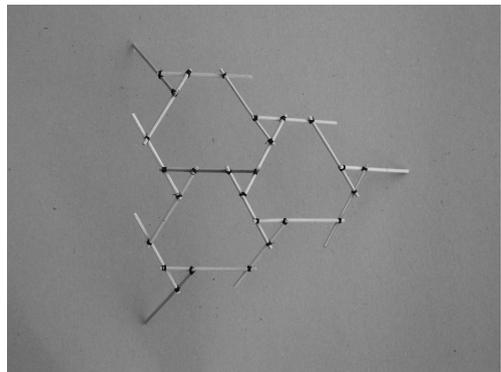
Módulo base: combinación de 3 cañas con ataduras a  $1/3$



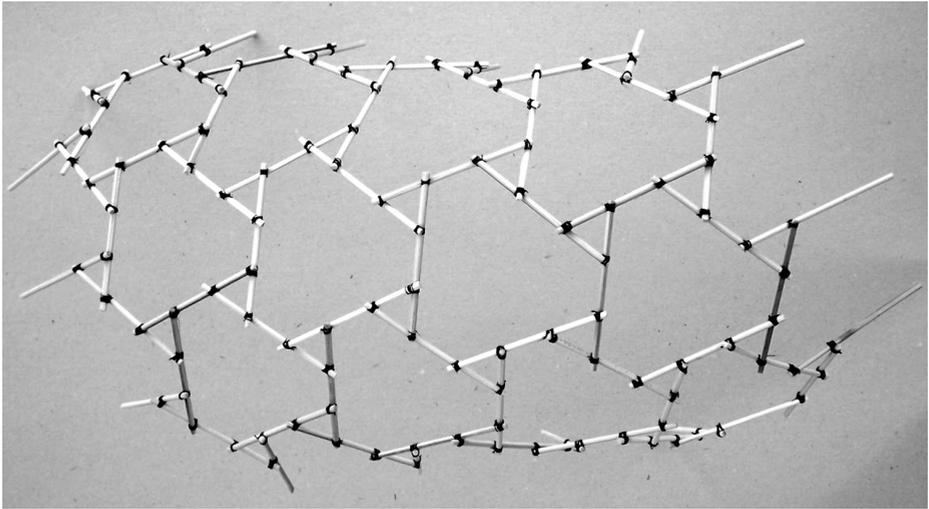
Vinculación de 3 módulos base: se genera la FIGURA PRINCIPAL.



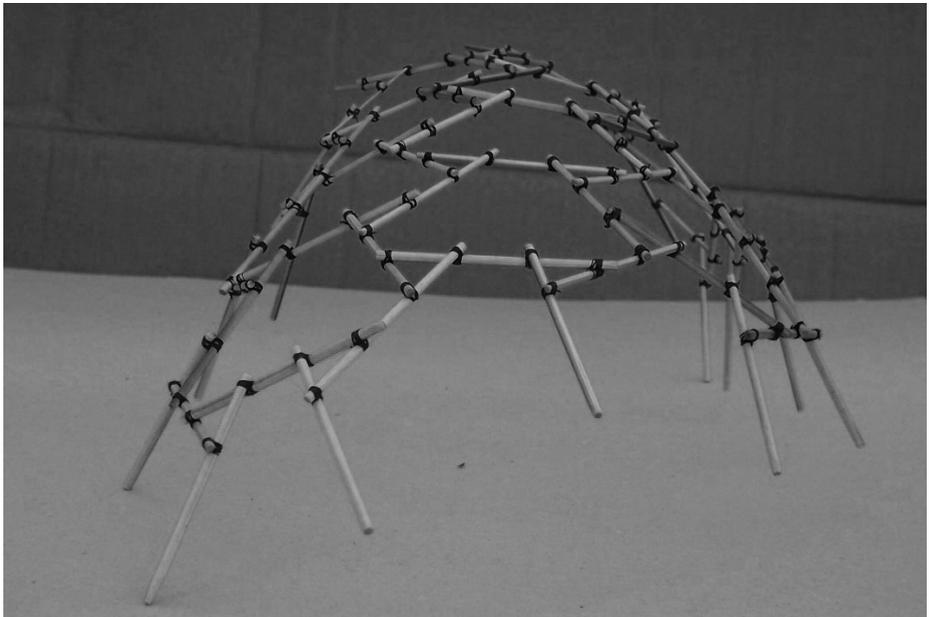
Vinculación de 3 figuras principales



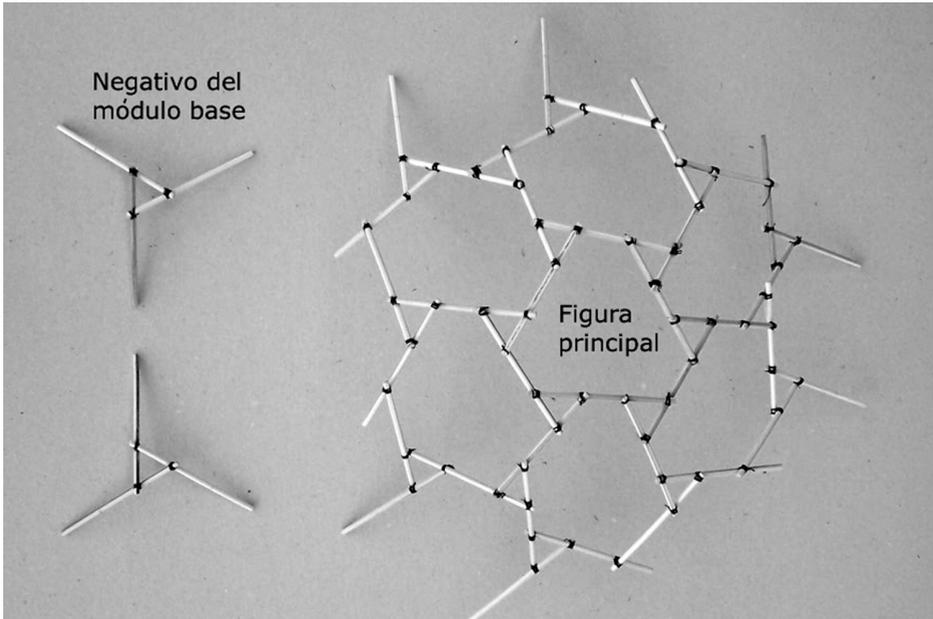
Vinculación de 3 figuras principales



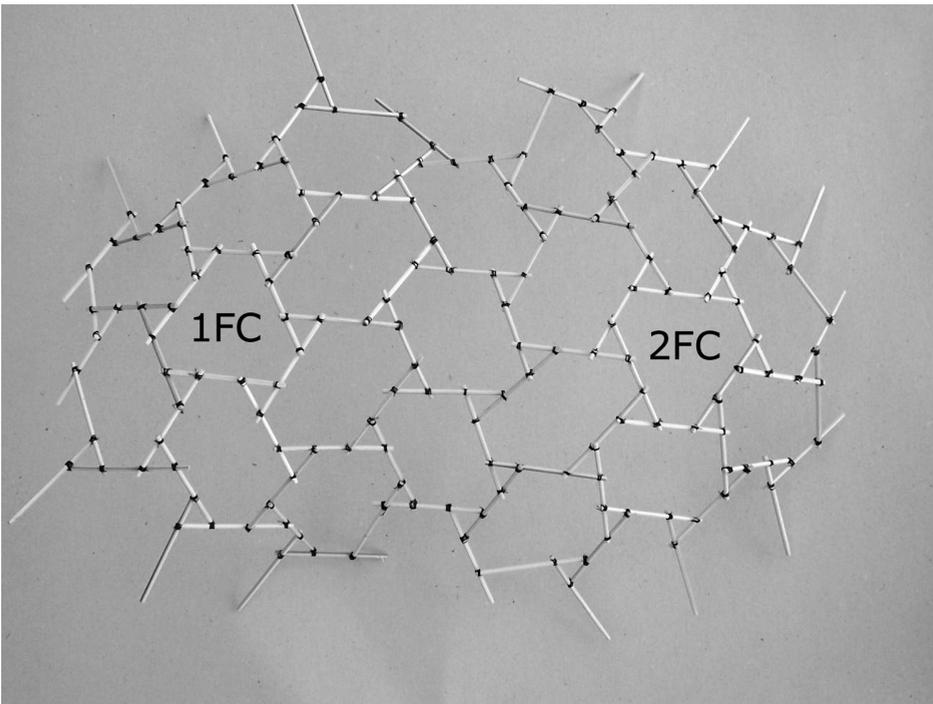
Combinación de varias figuras principales: generación de una bóveda



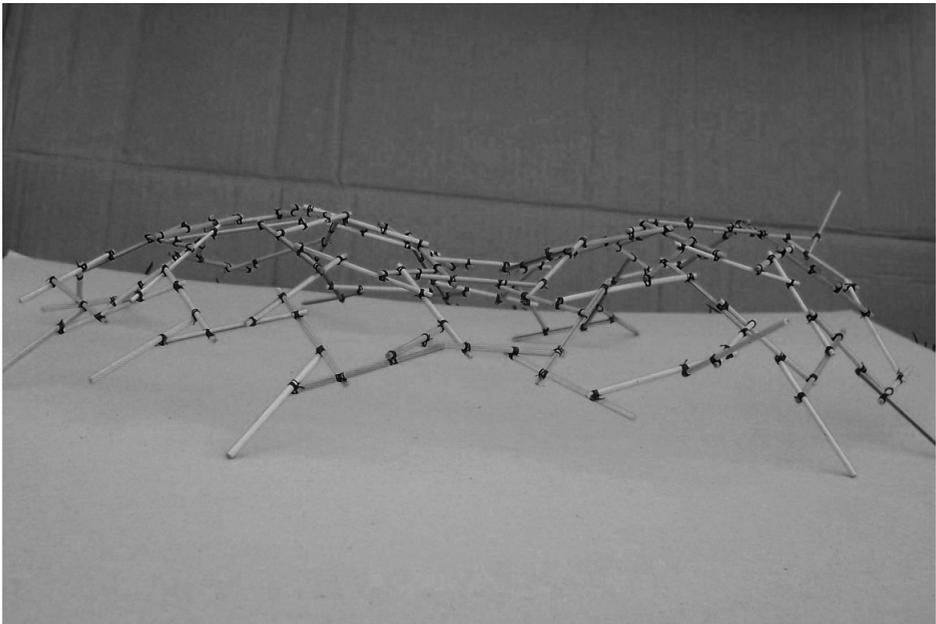
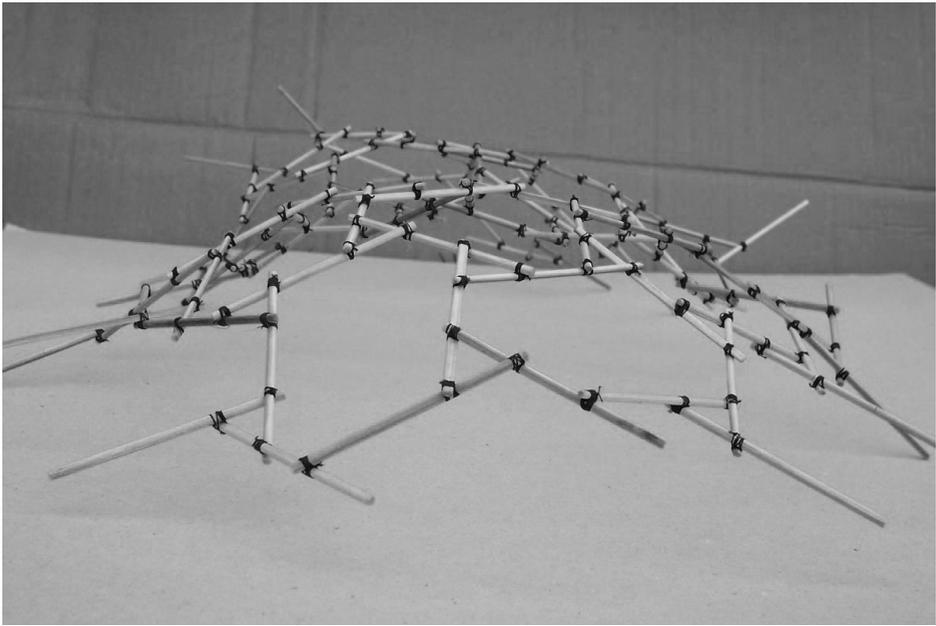
Alzado de la bóveda



Superficie de doble curvatura, la figura central está armada con el módulo base y en el cambio de curvatura se utiliza el negativo del módulo base.



Superficie de doble curvatura con 2 figuras centrales. Se trabaja únicamente con el módulo base inicial.

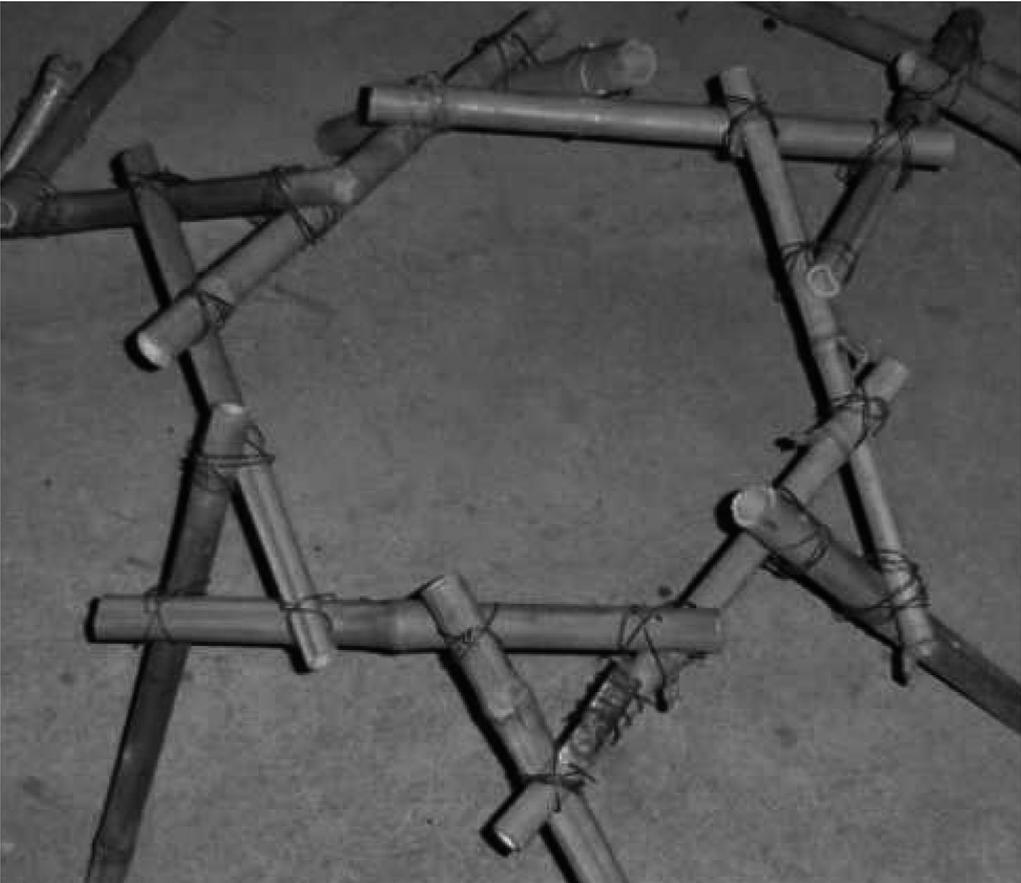


Alzado de la superficie de doble curvatura con 2 figuras centrales, trabajada con el módulo base inicial

## Modelo de cubierta en caña nacional ensayado

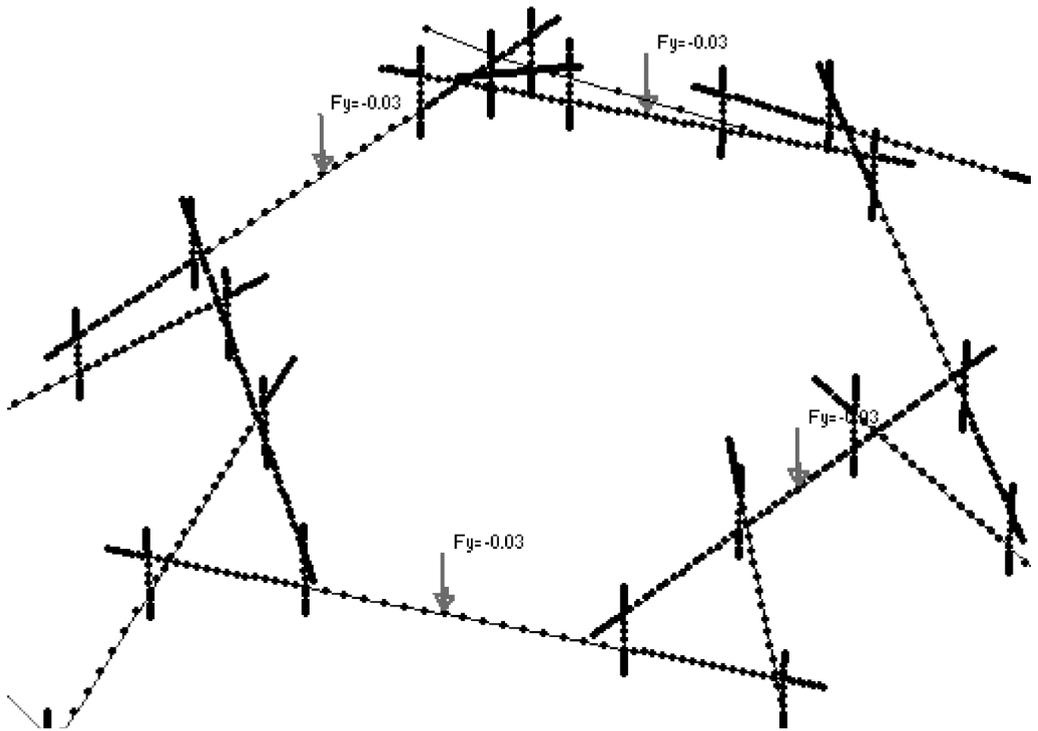
Se desarrolla entonces una unidad funcional estructural modélica de cubierta de doble curvatura construida con barras de caña tacuara nacional de pequeña longitud. Se ensaya en el Laboratorio del IC un prototipo de 70x70 cm en planta y 25 cm de altura, construido con barras de caña de 33 cm de longitud y 22 mm de diámetro, unidas con alambre de 1 mm.

Se lo carga de forma de transmitir la carga a cuatro puntos superiores, midiéndose mediante dos flexímetros la deformación (descenso) de otros dos puntos de la estructura.



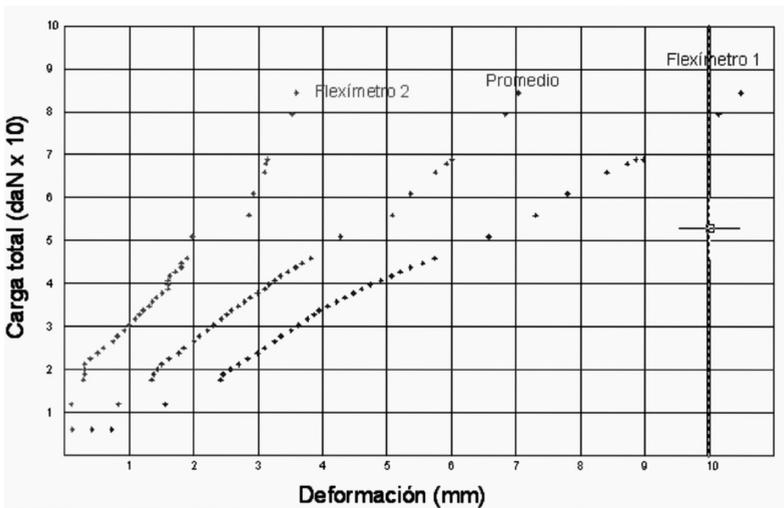
A continuación realizamos un estudio teórico, reproduciendo la geometría del prototipo en un programa de cálculo estructural y utilizando un material con un módulo de deformación  $E=190.800 \text{ daN/cm}^2$ , según la media de los resultados de nuestros ensayos de caña tacuara nacional.

Se lo carga según las saetas grises  $F_y$  del esquema y se mide la deformación.



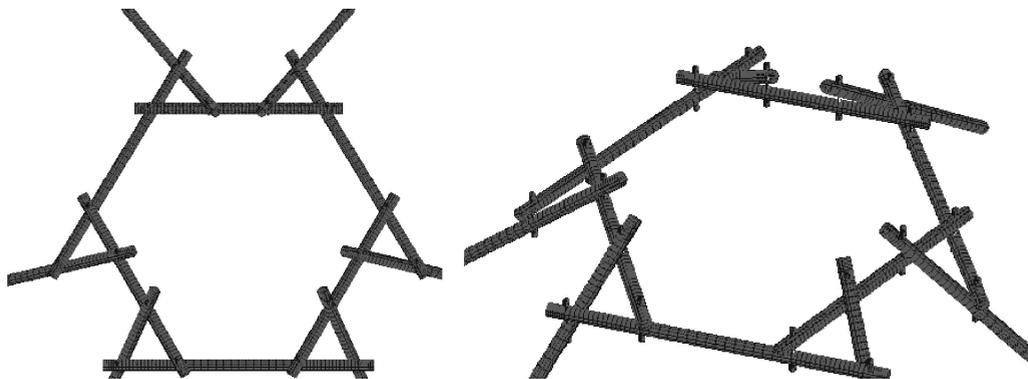


Se obtiene la relación carga-deformación para los puntos I y II y se determina la relación del promedio de ambas deformaciones en relación a los incrementos de carga.



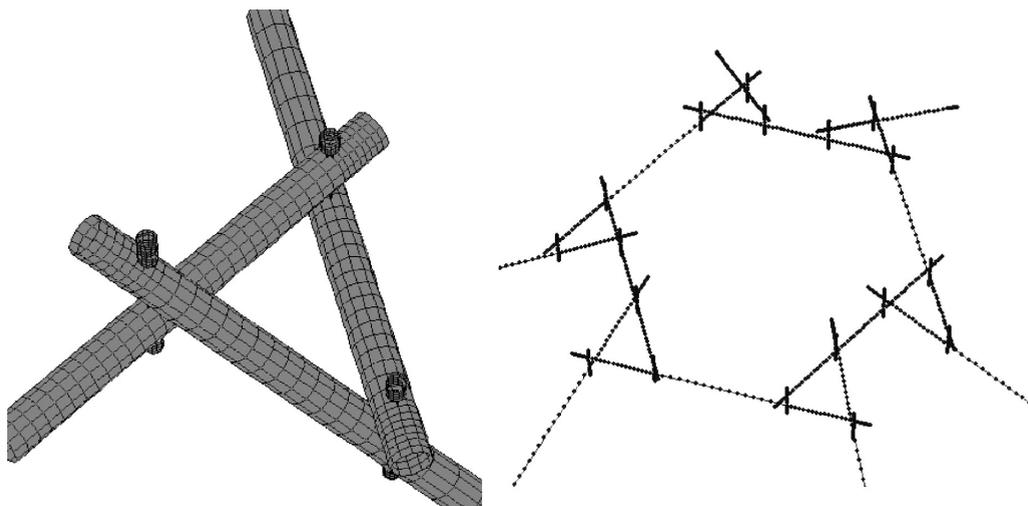
El estudio teórico sobre el modelo abstracto que intentamos representar y la unidad funcional se realiza reproduciendo la geometría de la unidad funcional ensayada en laboratorio.

Se sustituye el vínculo real de unión entre las barras: unión cada dos cañas, por un clavo siempre vertical que solidariza dos puntos, uno en cada caña. En el modelo teórico los dos puntos a unir están en una misma vertical, con iguales coordenadas en planta.



Como geometría de la sección de la caña usamos: diámetro externo  $D=22\text{mm}$ , espesor de pared  $e=2.1\text{mm}$ .

Usamos como módulo de deformación de las cañas  $E=190.800\text{ daN/cm}^2$ , en acuerdo a la media de nuestros ensayos. No usamos valores característicos sino medios, ya que estamos trabajando en la comparación del comportamiento del modelo ensayado en laboratorio con el modelo teórico.

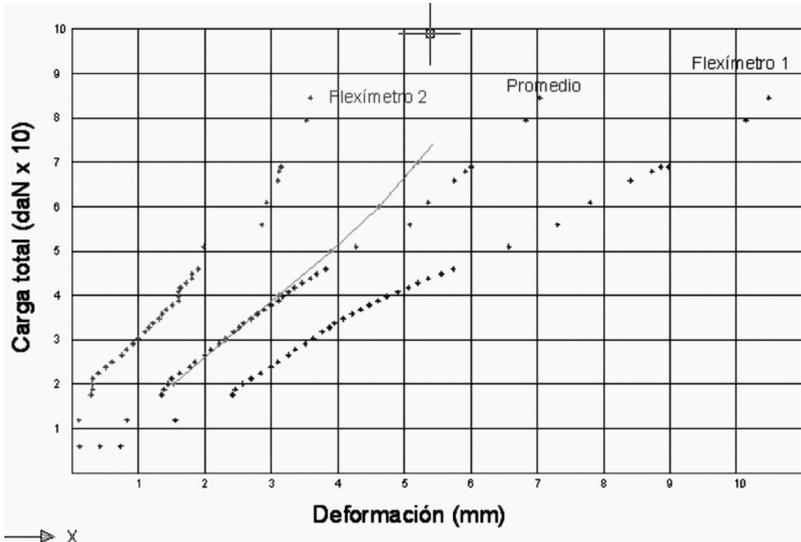


Con estos elementos se construye la matriz de rigidez de la estructura y en la hipótesis de la elasticidad se calculan los descensos en los puntos I y II (teóricos) mediante el programa AVwin. Representamos la media de los valores en I y II para comparar su andamio con la medida análoga del ensayo.

## Comparación de los resultados teórico-abstractos y teórico-experimentales

Representamos punteado (promedio) el andamio del ensayo en laboratorio y con línea llena el del análisis teórico.

Agregamos al gráfico anteriormente presentado el gráfico teórico.



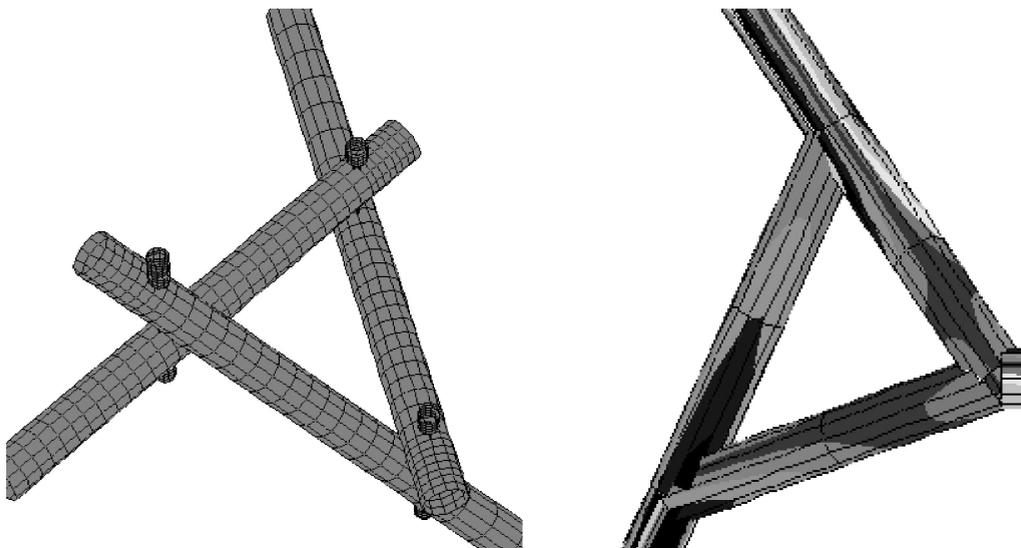
Se ve una buena correspondencia en la primera mitad del intervalo entre ambos modelos y luego se percibe nítidamente cómo comienzan a separarse.

Bajando el módulo de deformación de  $190.800 \text{ daN/cm}^2$  a  $152.000 \text{ daN/cm}^2$ , se resuelve satisfactoriamente la correspondencia necesaria del modelo teórico en relación al ensayo de laboratorio.

Para poder utilizar el modelo generando una superficie de doble curvatura de mayor superficie, lo simplificamos, perdiendo el acercamiento realizado a la realidad de los vínculos entre las cañas.

Para conseguir un comportamiento del nuevo modelo con buena adecuación al comportamiento real en la unidad funcional en estudio, debimos articular los vínculos que se señalan en la figura siguiente, manteniendo continuidad en el resto de los vínculos.

Diferencia entre los dos modelos:



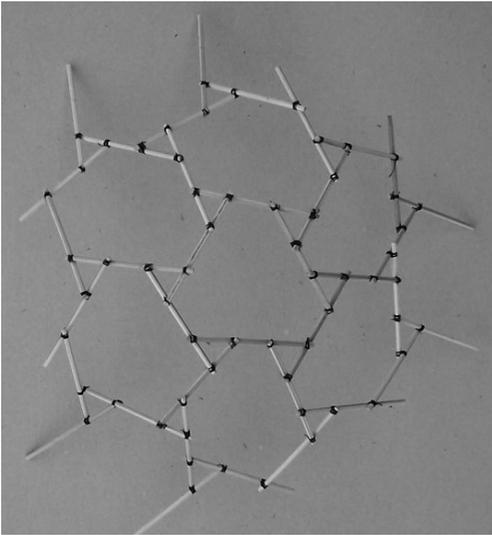
Todos los estudios y valoraciones, en tanto involucran valores obtenidos en ensayos, tienen una validez descriptiva que consideramos tan valiosa como orientadora. A pesar de que el número de ensayos realizado en algunos casos permite definir los intervalos de confianza exigidos y proyectar la validez de estas cuantificaciones más allá del presente trabajo, en otros casos el número no es suficiente y, por ejemplo, no se ha estudiado la influencia que hubiera podido tener en los resultados el origen geográfico de la caña o la edad de las probetas.

Por otra parte, el estudio de esta unidad funcional, que representa evidentemente un paso más adelante en la valoración del comportamiento estructural que los valores de probetas, muestra cómo la hipótesis teórica primaria debió modificarse, ello merece una profundización de la teoría o al menos un estudio del ajuste necesario realizado con cierta generalidad, que no se aborda en esta etapa.

Incuestionablemente los estudios realizados muestran la viabilidad del uso estructural del material y del sistema constructivo estudiado.

El camino recorrido cierra un círculo de los varios que hemos establecido:

- El estudio anterior nos lleva a imaginar diseños a partir de la unidad funcional estudiada que consideramos sugerentes y que merecerán un estudio próximo.
- La imagen primaria de cubiertas ligeras realizadas enlazando trozos de caña nos condujo a profundizar en el estudio del material, del proceso constructivo y de la unidad funcional definida.



*Para que la arquitectura sea de veras construida, los materiales no deben utilizarse sin un profundo respeto a su esencia y consiguientemente, a sus posibilidades; solo así, hagamos lo que hagamos, tendrá esa esencia cósmica que es lo que sostiene al mundo.*

Eladio Dieste

# Características de los tubos de cartón de sección cilíndrica

El arquitecto japonés Shigeru Ban ha trabajado desde los años noventa con tubos de cartón de sección circular como elementos estructurales portantes en construcciones eventuales, por lo que su obra es un referente para esta investigación. Nos contactamos con la arquitecta argentina Valeria Matayoshi, quien colaboró en el estudio de Ban y nos aportó un interesante material del cual hemos extraído las primeras conclusiones sobre el comportamiento del cartón.

## La arquitectura de Shigeru Ban

Shigeru Ban ha formado una asociación de profesionales llamada *Voluntary Architects Network* (VAN), que tiene por objetivo la ayuda a personas que han sido víctimas de desastres naturales. Ésta ha tenido oportunidad de actuar al producirse en 1994 el terremoto en la ciudad japonesa de Kobe, donde miles de personas perdieron su hogar. Según Ban «las personas que han sufrido esta clase de pérdidas se encuentran en una situación de vulnerabilidad tal que necesitan de un refugio agradable para poder enfrentar esa adversidad y superarla». En nuestro país habitualmente se presentan situaciones de emergencia, sobre todo por inundaciones cada vez más frecuentes en los últimos años, provocadas por una radicalización de las condiciones climáticas, vientos fuertes y por efecto de la marginalidad.

Basado en sus experiencias exitosas, Ban ha aplicado este tipo de estructuras a programas más permanentes. Es así que ha construido equipamientos tales como bibliotecas, museos, pabellones de exposiciones, hangares, etc., llevando las posibilidades estructurales a límites más amplios y demostrando que con ciertas modificaciones es totalmente factible pensar en la utilización de estos materiales con otros fines, más allá de meras estructuras de refugio o *shelters*.

Ban resuelve las uniones entre tubos con cubos de madera a los cuales acopla cilindros a los que se atornillan los tubos. El mecano es completado por tensores que arriostran estas uniones rígidas, garantizando la indeformabilidad del conjunto.

Creemos que la generación de modelos estructurales basados en la utilización de tubos de cartón merece ser considerada y analizada. Pretendemos entonces comparar en este trabajo las características expuestas en la obra de Ban, con las de los tubos de cartón de desecho encontrados en nuestro medio.

## Características básicas de comportamiento de los tubos de papel

Los tubos de papel que encontramos tienen sus orígenes en componentes de empaque de telas, envases de papel enrollado, etc. El procedimiento de fabricación de estas piezas consiste generalmente en enrollar láminas finas de cartón en forma concéntrica y en diagonal, dando como resultado tubos que en un principio no tienen un largo definido.

El comportamiento de los tubos sometidos a tensiones es muy distinto para cargas aplicadas instantáneamente que para cargas aplicadas en forma gradual. En el pabellón de Japón para la Expo de Hannover, la forma básica de la cubierta fue obtenida a partir de un entramado de tubos que fueron montados sobre un plano horizontal y luego llevados a su posición definitiva mediante puntales regulables que fueron gradualmente elevados, hasta conseguir la forma curva buscada.

El grado de humedad de los tubos tiene una gran influencia en los valores de tensiones admisibles, módulo de Young y módulo de Poisson.

Existen tratamientos químicos para impermeabilizar el cartón y prevenir el ataque de agentes biológicos dañinos como hongos, insectos, etc.

El andamio que observamos en una gráfica de tensión-deformación es similar, en el período elástico, al que podemos observar en el hormigón (parábola rectángulo).

Los valores de tensiones de rotura observados en probetas sometidas a flexión son 1,42 veces mayores a aquellos registrados en probetas comprimidas.

## Valores obtenidos en ensayos a compresión realizados por el arquitecto Shigeru Ban

### 1- Obra: Library of a poet

Comportamiento a largo plazo bajo fuerza axial constante

Tubos:  $D = 100 \text{ mm}$ . Esp.  $12.5 \text{ mm}$   $L = 400 \text{ mm}$ .

Área:  $\frac{\pi}{4} \times (10^2 - 7.5^2) = 34.3 \text{ cm}^2$

Axil:  $N = \frac{34.3 \text{ cm}^2 \times 103.2 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}}{3} = 1180 \text{ daN} \approx 1000$

(Se toma un tercio del Axil máximo)

Deformación elástica  $\frac{1000 \text{ daN} \times 40 \text{ cm}}{34.3 \text{ cm}^2 \times 1.86 \times 10^4 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}} = 0.0627 \text{ cm}$

Probetas	A (cm <sup>2</sup> )	P (daN)	$\sigma_{\max}$ (daN/cm <sup>2</sup> )	E (x10 <sup>4</sup> daN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon$
A1	33.26	3335.0	100.3	1.86	0.192
A2	33.50	3640.0	108.7		
A3	33.50	3405.0	101.7	1.98	0.180
A4	33.20	3452.5	104.0	1.89	0.187
A5	33.65	3405.0	101.2	1.82	0.187
Promedio			103.2	1.86	0.189

### **Ensayos a compresión instantáneos**

El promedio de tensión máxima de rotura en tubos de papel fue de 113.9 daN/cm<sup>2</sup>

El módulo de elasticidad  $E = 2.41 \times 10^4$  daN/cm<sup>2</sup>

El módulo de Poisson 0.038

Estos valores fueron obtenidos en base a probetas con un contenido de humedad de 8.8%.

### **Ensayos a flexión**

El valor promedio de la tensión a flexión  $\sigma_{\max} = 161.3$  daN/cm<sup>2</sup>

El valor del módulo de elasticidad  $E = 2.22 \times 10^4$  daN/cm<sup>2</sup>

Estos valores fueron obtenidos en base a probetas con un contenido de humedad de 9%.

## **2- Obra: Paper Dome**

Tubos: Dext = 291 mm. Dint = 12.5 mm L = 600 mm.

### **Ensayos a compresión instantáneos**

Valores promedio obtenidos:

Tensión de rotura a compresión  $\sigma_c = 99.3$  daN/cm<sup>2</sup>

El módulo de elasticidad  $E = 21.1 \times 10^4$  daN/cm<sup>2</sup>

El módulo de Poisson 0.041

Estos valores fueron obtenidos en base a probetas con un contenido de humedad de 10%

La densidad de los tubos  $\sigma = 0.817$  g/cm<sup>3</sup>

### **Ensayos a flexión**

Tensión de rotura a flexión  $\sigma_{\max} = 152.0$  daN/cm<sup>2</sup>

El módulo de elasticidad  $E = 21.5 \times 10^4$  daN/cm<sup>2</sup>

Estos valores fueron obtenidos en base a probetas con un contenido de humedad de 10.2%.

En todos los casos se comprobó que los valores de tensiones máximas, tanto a compresión como a flexión, decrecen en forma inversamente proporcional al contenido de humedad de los tubos.

En el desarrollo del presente estudio se pretendió verificar estos valores y extrapolarlos a los tipos de material que se encuentran disponibles en nuestro medio.

## Ensayos realizados en el Laboratorio del IC sobre las propiedades mecánicas de los tubos de cartón

Se ensayaron muestras obtenidas de diversas fuentes: tubos de rollos de textiles y rollos de papel que se desechan en Montevideo.

Se trabajó en base a la norma *ISO 22157 - 1 Bamboo - Determination of physical and mechanical properties* a falta de una normativa específica para tubos de este material.

Se realizaron dos tipos de ensayos:

### 1- Ensayo de probetas de tubo de cartón a compresión simple

Se cortaron probetas de todos los tipos disponibles dentro de la muestra y se ensayaron en la prensa a compresión instantánea. A continuación se exponen los resultados obtenidos.

Tabla T1. Ensayo de tubos de cartón a compresión paralela al eje longitudinal.							
Tubo	Largo (cm)	Dext (cm)	Esp (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Prensa (daN/cm <sup>2</sup> )	Fult (daN)	Tensión (daN/mm <sup>2</sup> )
1.1	23	11.5	6.25	2134.22	7.5	1117.5	0.524
1.2	23	11.5	6.25	2134.22	7.5	1117.5	0.524
1.3	23	11.5	6.25	2134.22	7	1043	0.489
1.4	23	11.5	6.25	2134.22	7.75	1154.75	0.541
2.1	16.5	8.4	4.0	1823.21	3.0	447	0.245
2.2	16.5	8.4	4.0	1823.21	3.25	484.25	0.266
2.3	16.5	8.4	4.0	1823.21	3.75	558.75	0.306
3.1	16	8.3	2.5	631.93	1.55	230.46	0.365
3.2	16	8.3	2.5	631.93	1.55	230.64	0.365
3.3	16	8.3	2.5	631.93	1.55	230.64	0.365
4.1	11	5.65	2.8	472.13	1.05	156.24	0.33
4.2	11	5.65	2.8	472.13	1.05	156.24	0.33
4.3	11	5.65	2.8	472.13	1.05	156.24	0.33
5.1	11	5.6	2.75	459.81	1.05	156.24	0.34
5.2	11	5.6	2.75	459.81	1.05	156.24	0.34
5.3	11	5.6	2.75	459.81	1.05	156.24	0.34

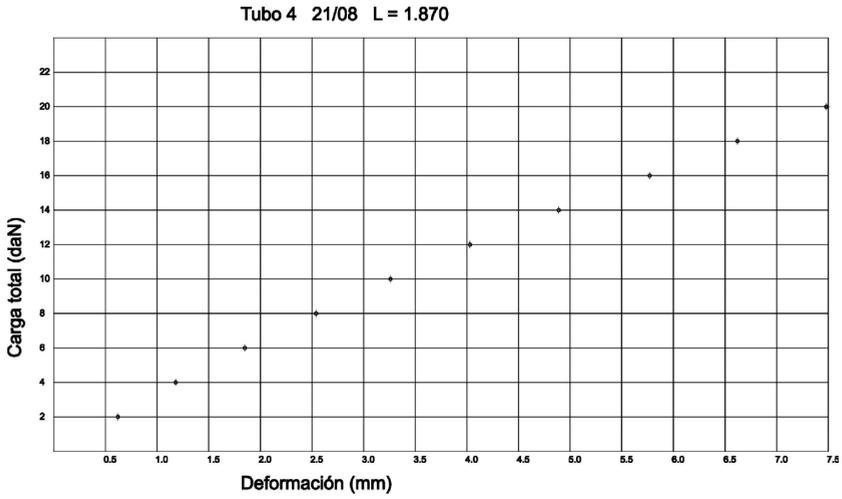
## 2. Ensayos de tubos de cartón a flexión simple

Se trabajó con muestras de tubos de la mejor calidad encontrada. Las probetas tenían un largo promedio de 1,80m y un diámetro exterior de 11,5 cm.



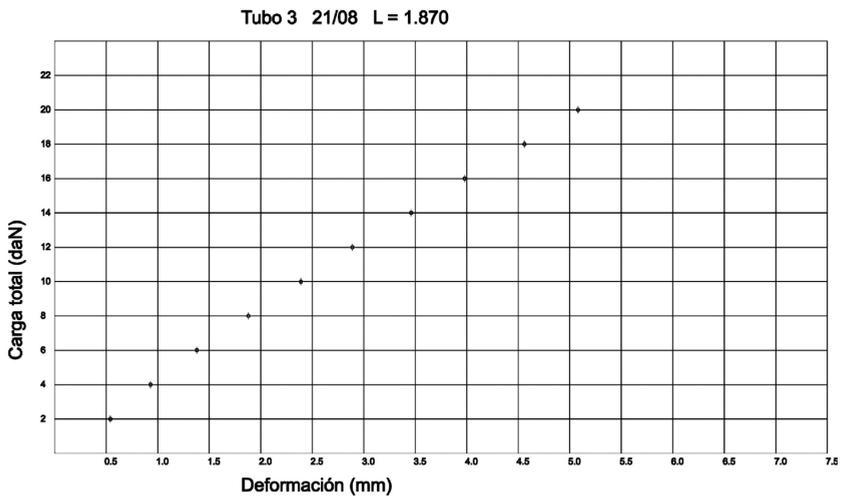
# Gráficas de valor del módulo de elasticidad a partir de los ensayos a flexión

Tubo 1.



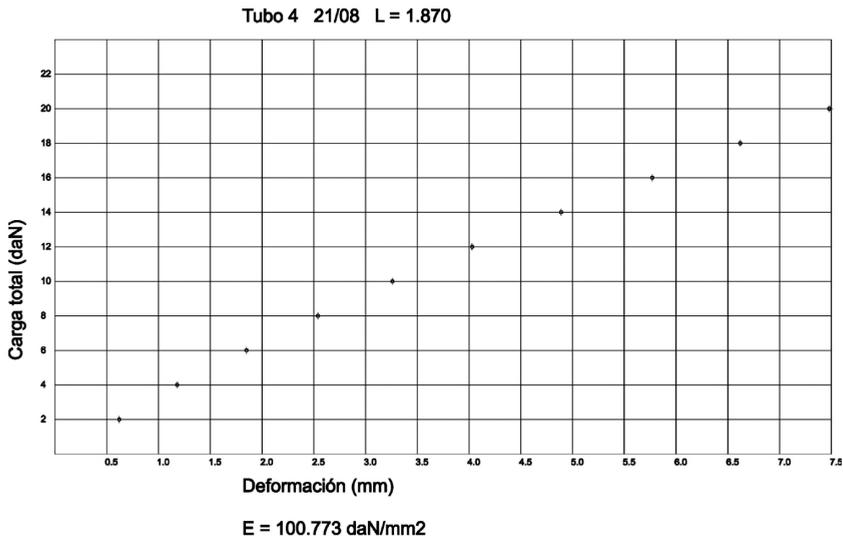
$E = 100.773 \text{ daN/mm}^2$

Tubo 3.



$E = 150.757 \text{ daN/mm}^2$

## Tubo 4.



## Hipótesis de comportamiento de los tubos de cartón

En la mayoría de los casos las tensiones obtenidas, si bien no alcanzan los valores señalados en las publicaciones consultadas, están en el orden y presentan una gran regularidad. Esto hace pensar que las calidades de los tubos de cartón de descarte en nuestro medio están algo por debajo de los utilizados en los ejemplos japoneses referidos. Hay que tener en cuenta que los tubos con que trabaja Shigeru Ban son específicamente elaborados para ser utilizados con fines estructurales.

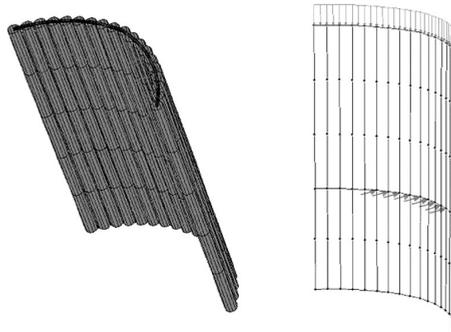
Confirmamos entonces la viabilidad de uso de nuestros tubos de cartón de desecho en estructuras livianas.

Es de señalar el hecho de que superados ciertos valores de tensiones, en ensayos a largo plazo, se observa una deformación de los tubos diferida para cargas aplicadas constantes. De hecho, esta característica del material fue utilizada en obras como el Pabellón de Japón en la Expo de Hannover, cuya cubierta se construyó en un plano horizontal y luego se deformó progresivamente hasta llegar a su forma definitiva.

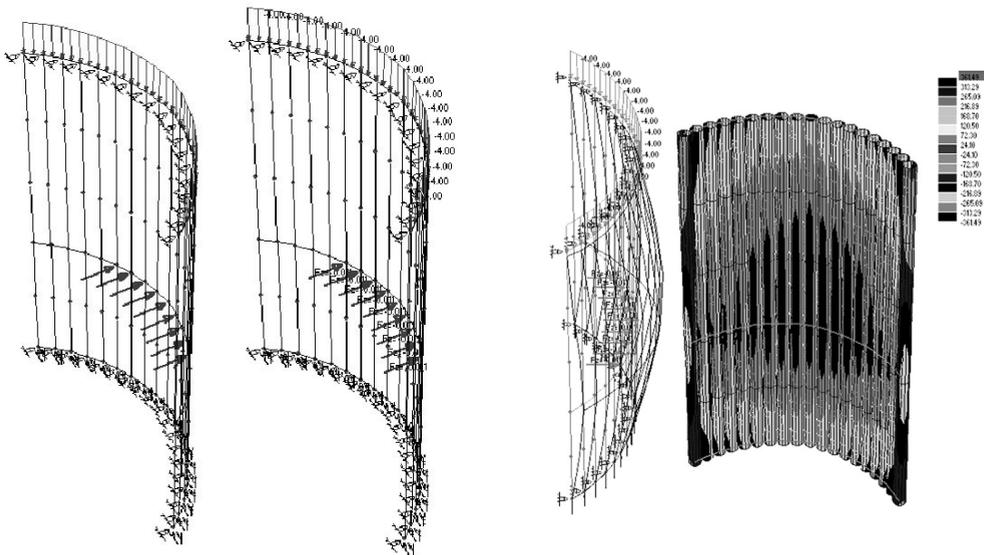
Se señala en la bibliografía que estos tubos, luego de ser sometidos a ensayos a flexión, no muestran variaciones significativas en sus tensiones admisibles máximas.

## Modelización teórica de una unidad estructural de tubos de cartón

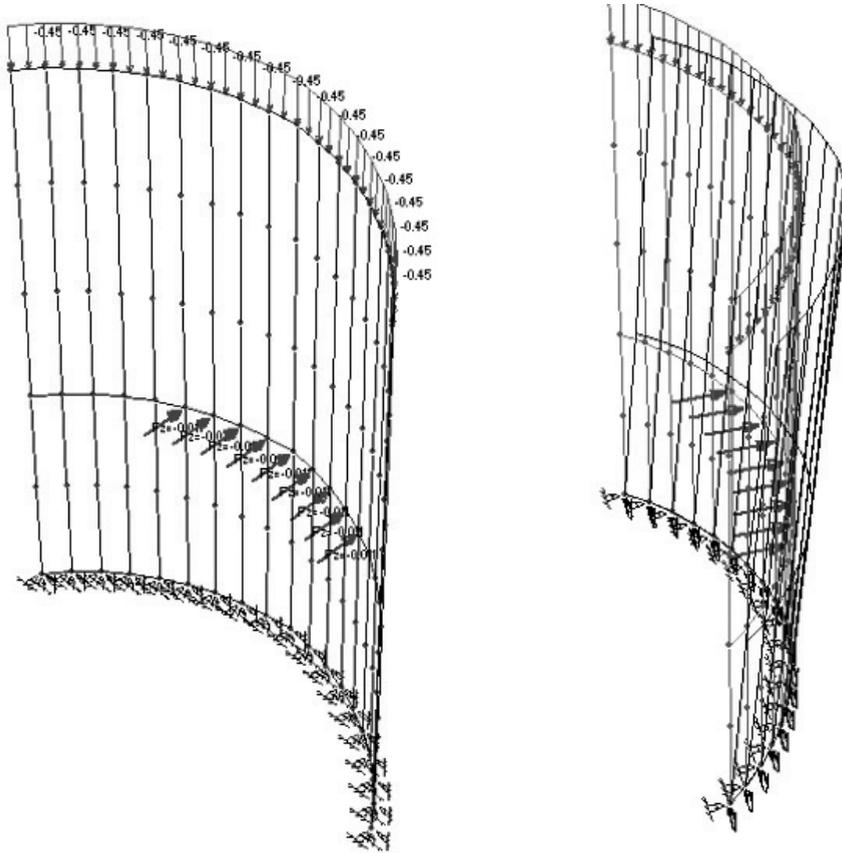
Modelizamos una pantalla estructural de tubos de cartón con planta en forma de arco, solidarizando en su parte superior, inferior y a 1 m de altura una serie de tubos de diámetro exterior  $D=12\text{cm}$  y espesor  $e=8\text{mm}$ . La cargamos horizontalmente a 1 m de altura con 100 daN y determinamos la máxima carga vertical que era capaz de soportar en esas condiciones.



Si consideramos los vínculos al cimiento asimilables a una articulación fija para cada tubo y suponemos que el resto de la estructura arriostra la parte superior de los tubos, la deformación resulta de 1 cm en horizontal y de 0,25 cm en vertical. El valor límite para la carga vertical resulta de 4000 daN/m, dando una tensión máxima en los tubos de  $36\text{ daN/cm}^2$ . La tensión media obtenida en nuestros ensayos fue de  $37.5\text{ daN/cm}^2$ .

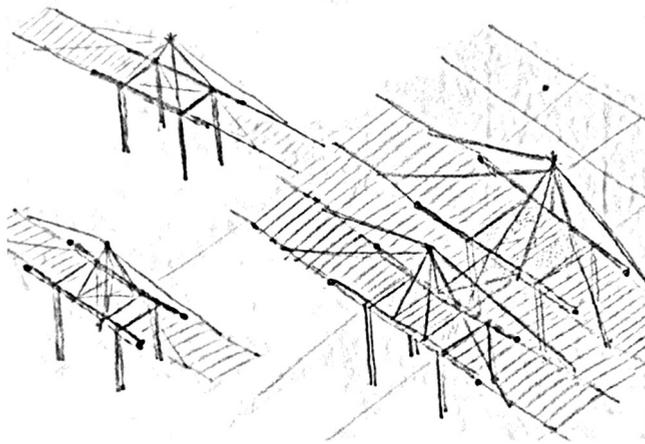


Si consideramos los vínculos al cimiento asimilables a una articulación fija para cada tubo y suponemos que el resto de la estructura no arriestra la parte superior de los tubos, la carga vertical límite resulta de 450 daN/m desde el punto de vista resistente. La deformación resulta inadmisibles en este caso: 18 cm en horizontal. El control de la deformación, por lo tanto, prácticamente descarta la posibilidad de uso de esta unidad si no está solidarizada superiormente.





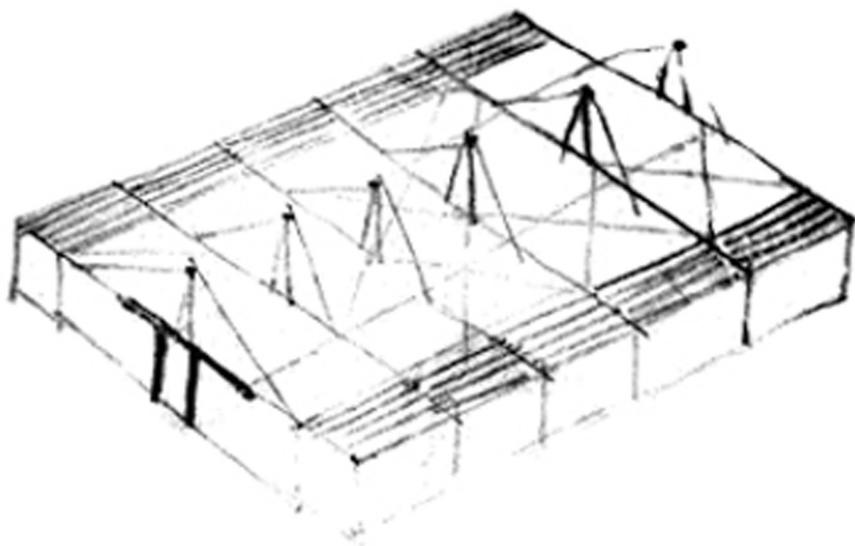
## Algunas propuestas de estructuras temporales



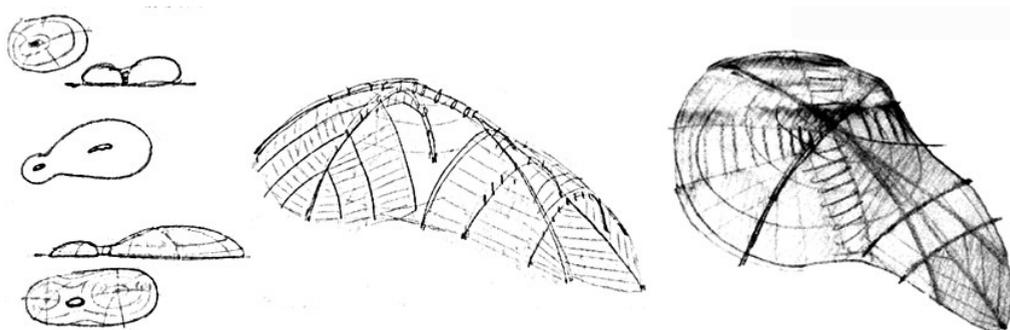
Propuestas esquemáticas



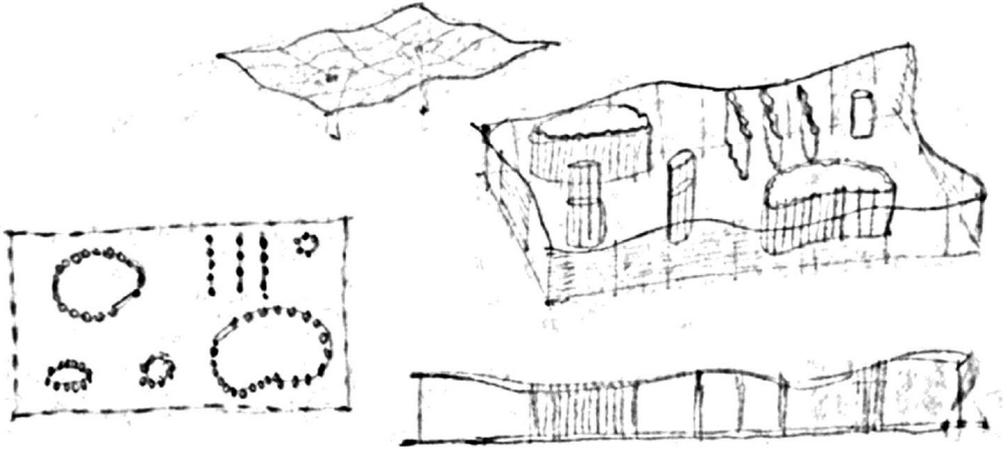
Vivienda con estructura aporcada en tubos de cartón



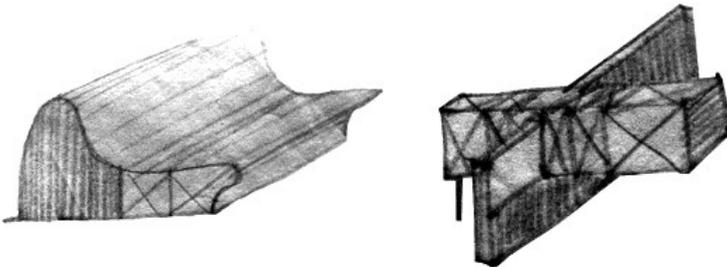
Espacio para exposiciones temporales con estructura en arcos de caña nacional



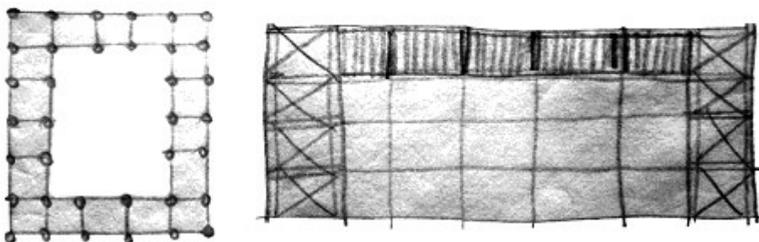
Refugio colectivo con estructura en tubos de cartón y cubierta en caña nacional



Espacio para actividades temporales con cubierta en caña nacional y vivienda en dos niveles con estructura mixta en tubos de cartón y caña



Espacio para actividades temporales con estructura reticulada en tubos de cartón conformando un gran espacio central



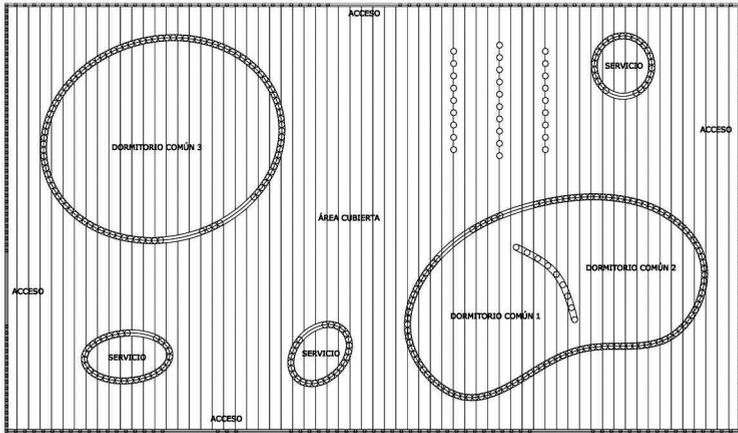
## Refugio colectivo con estructura en tubos de cartón y cubierta de doble curvatura en caña nacional

Se trata de un refugio colectivo temporal de muy bajo costo, totalmente desmontable y transportable, muy rápido de armar y capaz de brindar alojamiento a un gran número de personas en situación de emergencia.

El perímetro exterior del refugio y las habitaciones cerradas se conforman con paredes de tubos de cartón que apoyan en vigas de madera, que a su vez descargan en cajones plásticos rellenos de arena. Sobre dichas paredes de cartón se sostiene una cubierta de doble curvatura realizada con barras de caña nacional.

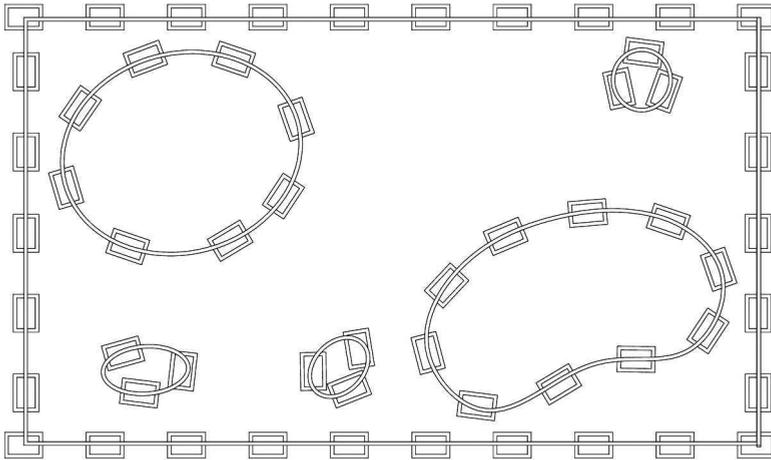
Es una estructura que muy fácilmente puede ampliarse o acoplarse a otras similares para formar unidades de mayor tamaño.

# Plantas

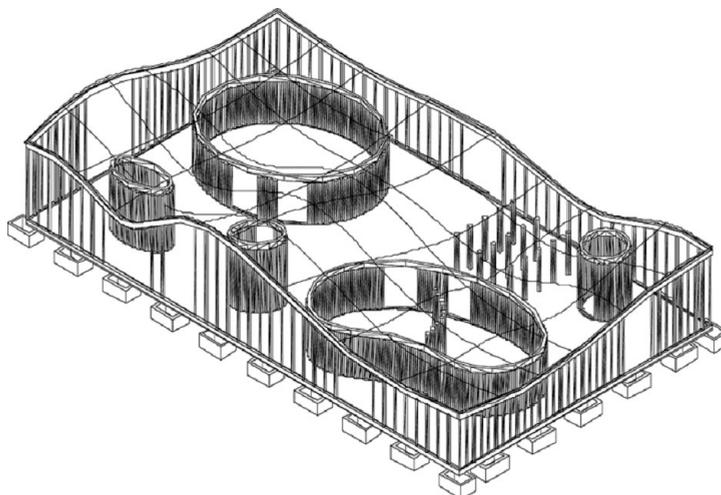
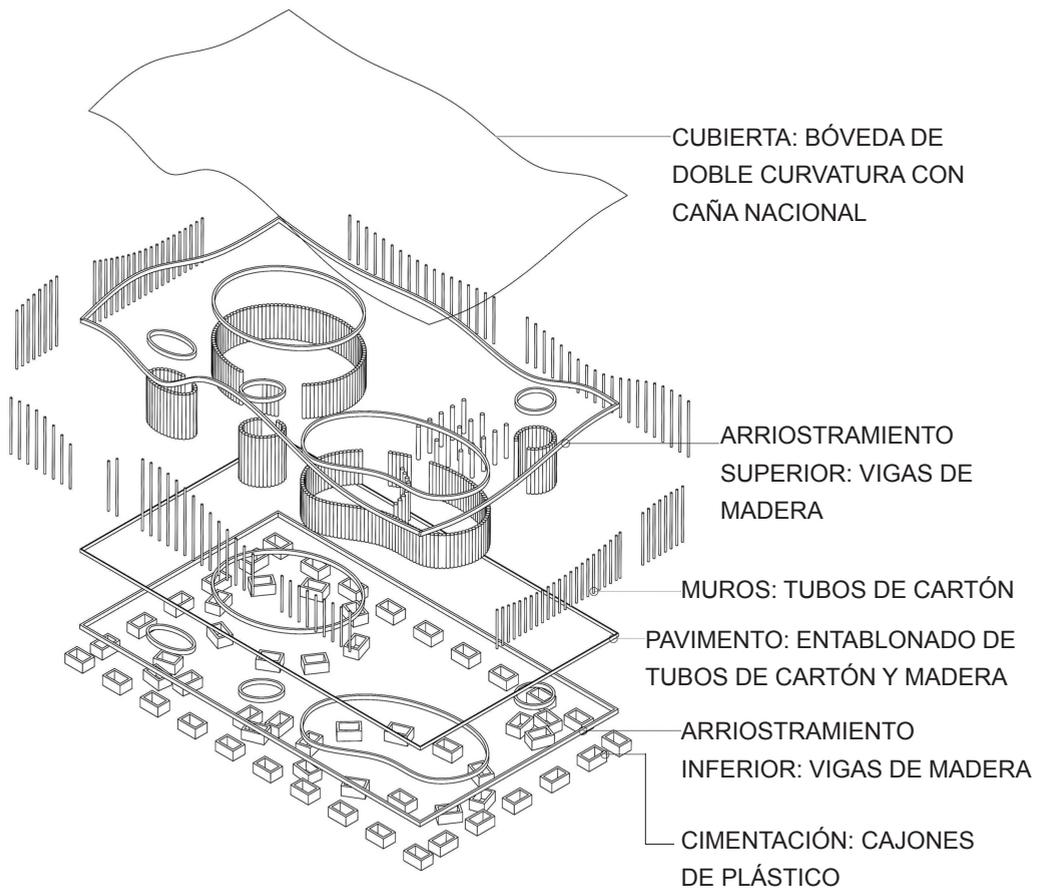


PLANTA BAJA

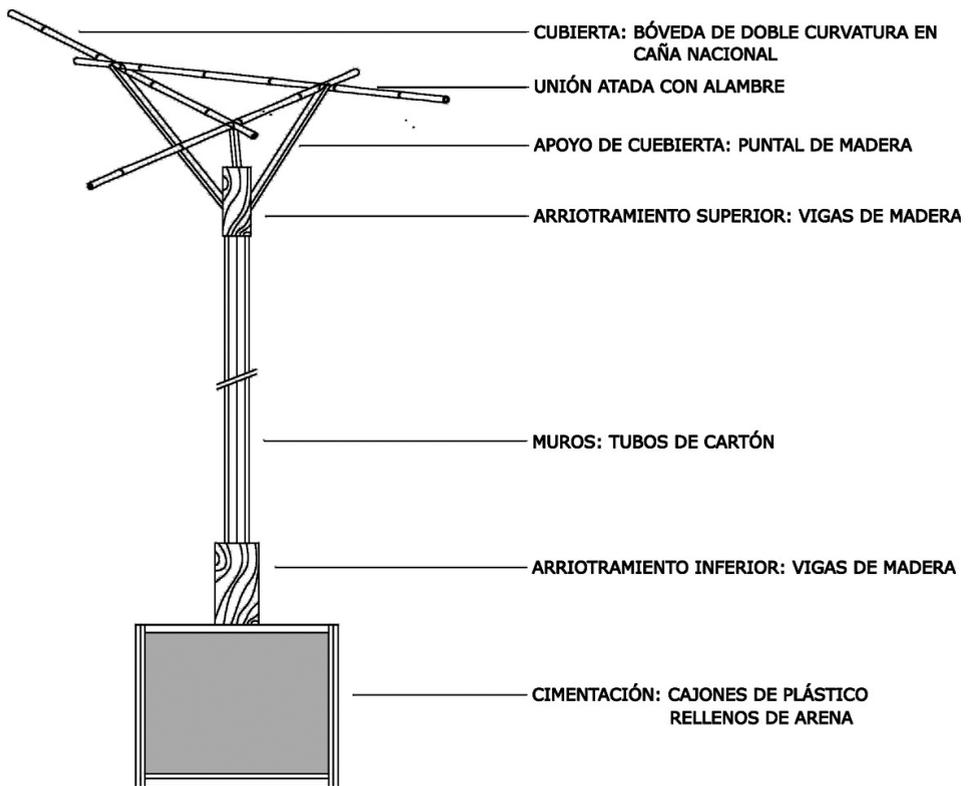
## Despiece constructivo



PLANTA DE CIMENTACIÓN



Croquis



Sección constructiva

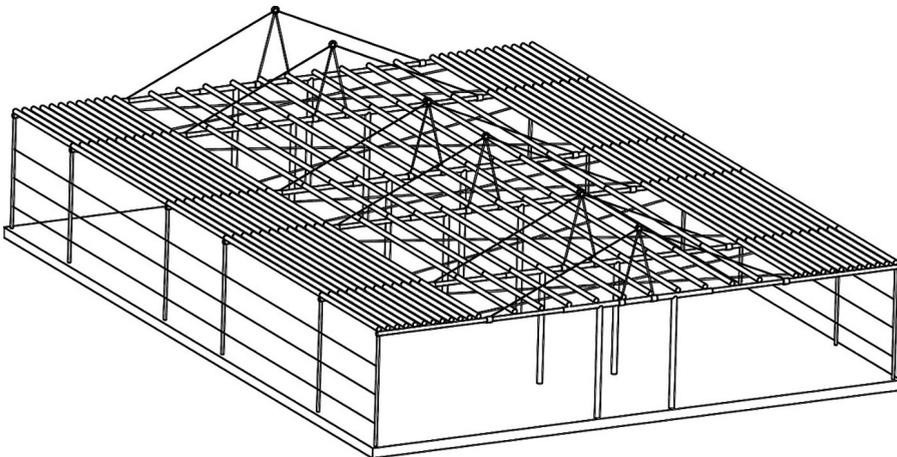
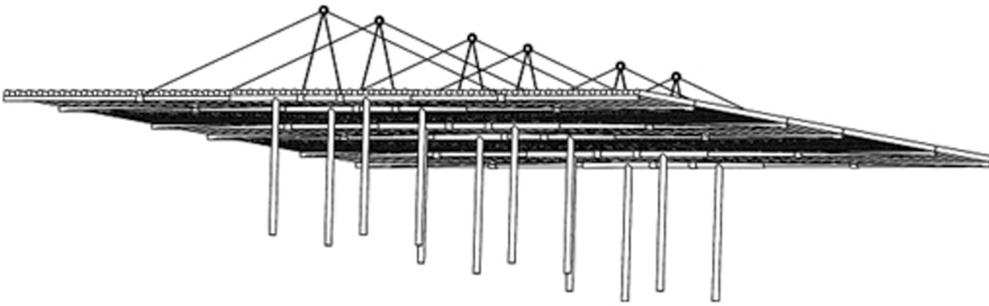
## Recinto cubierto con núcleo central aporricado de tubos de cartón

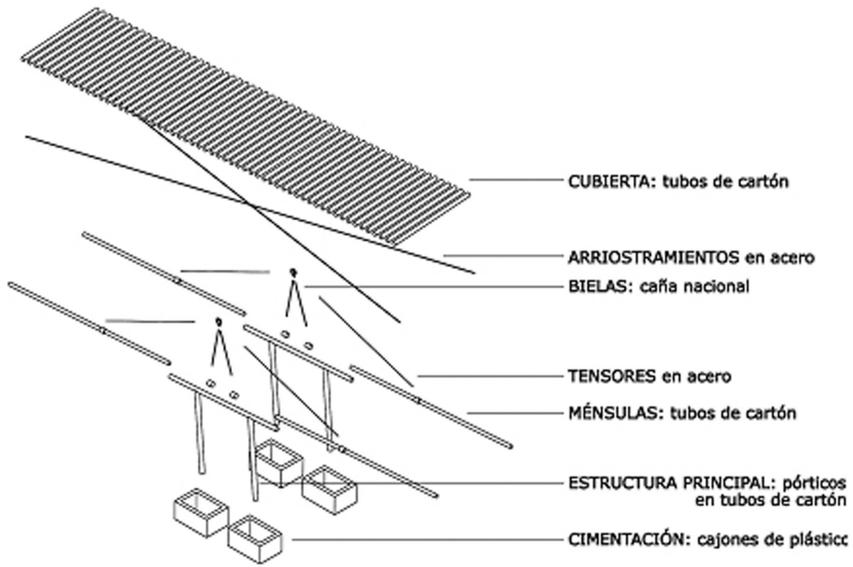
Un pórtico rígido central realizado con tubos de cartón y apoyado en cajones plásticos rellenos de arena, sirve de soporte a dos grandes ménsulas también de tubos de cartón, capaces de generar un espacio cubierto de grandes luces.

La banda central, generada por los soportes verticales de los pórticos, define un posible espacio de servicios.

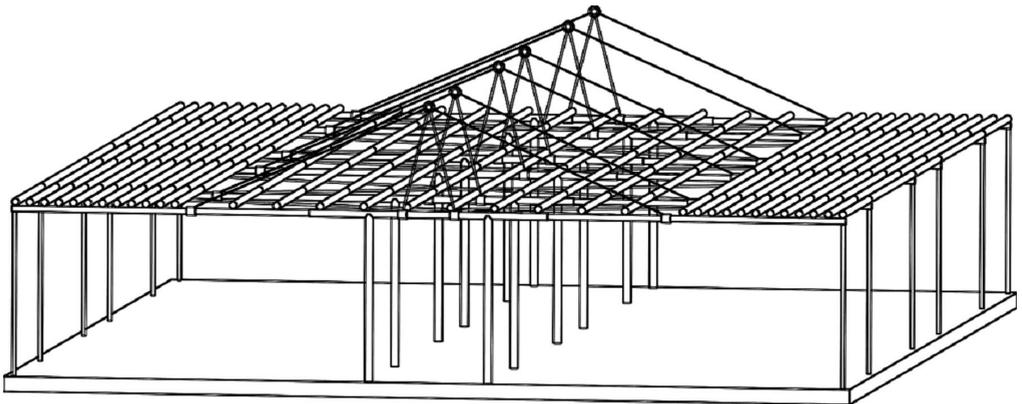
Sin cerramientos laterales puede funcionar como espacio de reuniones, parador, local de ventas al aire libre, etc. Si se cierra puede funcionar como vivienda unifamiliar temporal.

Croquis

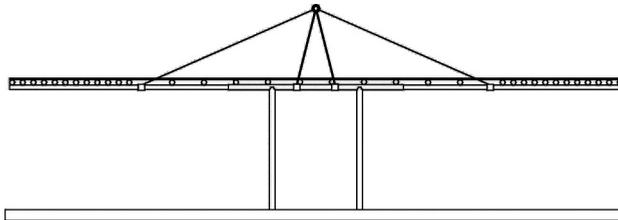
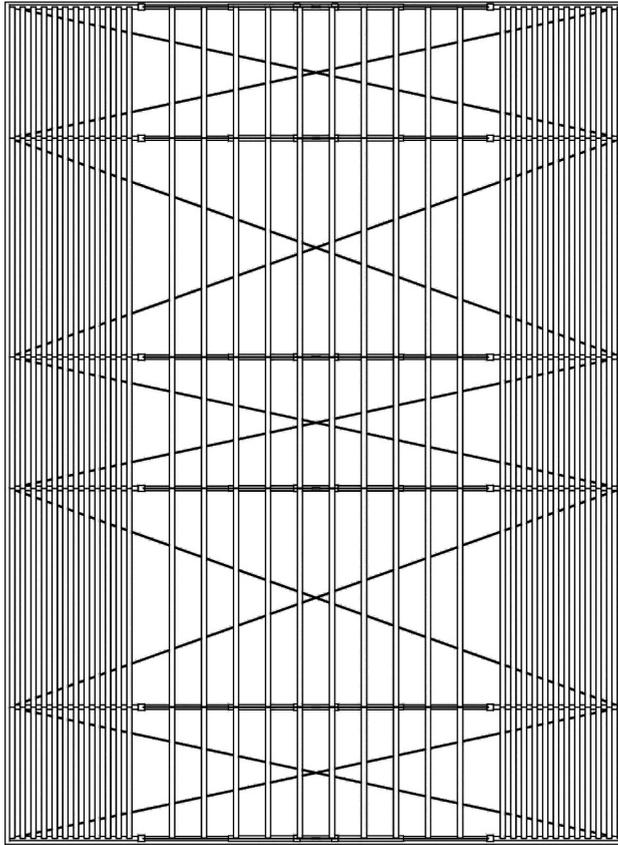




Despiece constructivo



Croquis

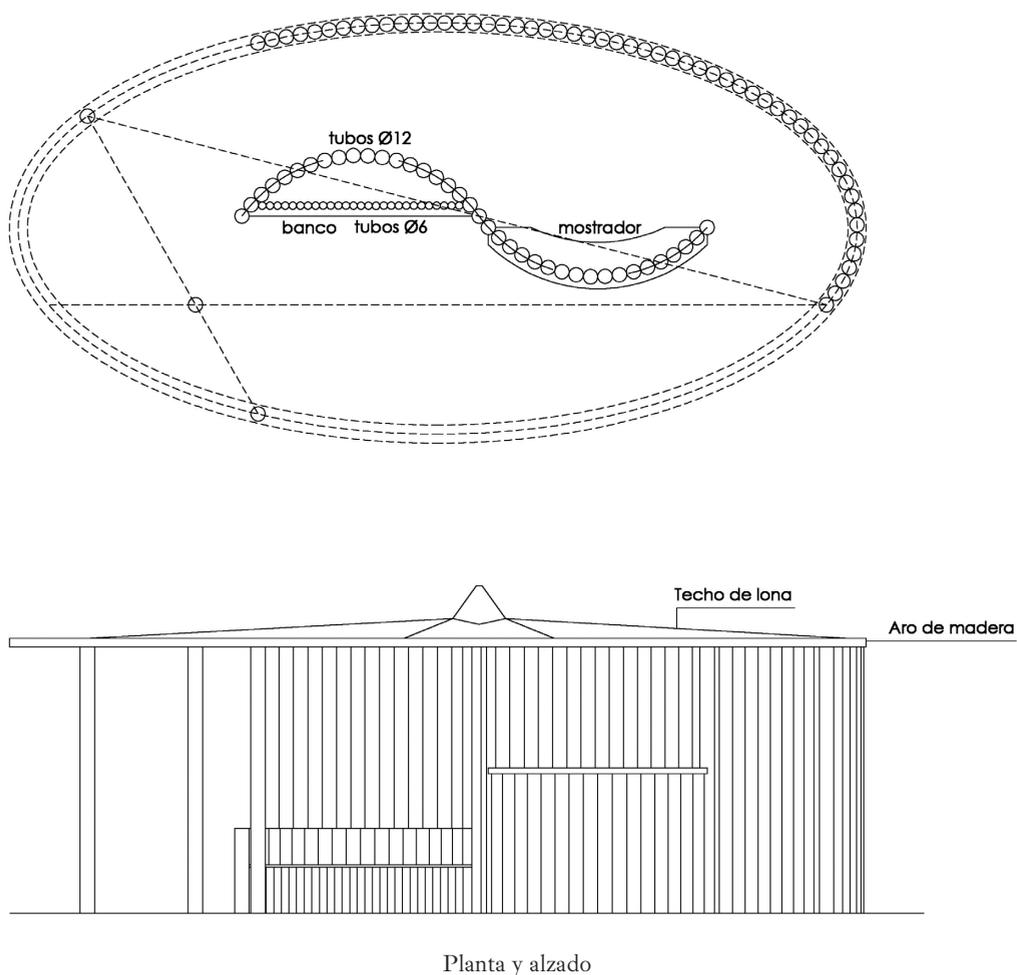


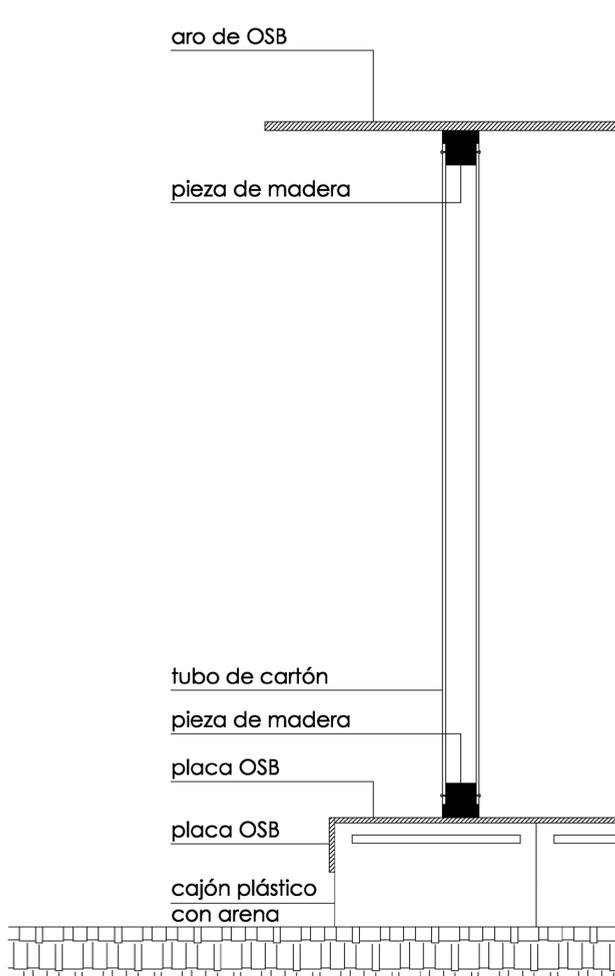
Planta y sección

## Prototipo de estructura liviana temporal stands de exposiciones

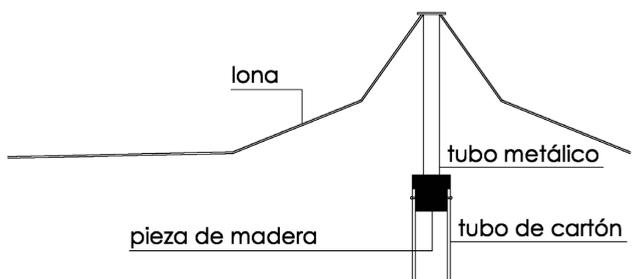
Como se mencionó anteriormente una de las vertientes de este trabajo abarca el estudio de estructuras en base a papel, más concretamente la utilización de tubos de cartón de sección circular, los cuales pueden ser usados como elementos estructurales portantes tanto para construcciones eventuales como para soluciones temporales alternativas de alojamiento.

Haciendo un estudio de diferentes tipologías posibles para su aplicación en prototipos que contemplen diferentes programas arquitectónicos es que proponemos el estudio de un prototipo de estructura temporal liviana destinada a estands de exposición temporal.





Despiece constructivo: detalle de tubo pilar con aro que sostiene lona de cubierta cimentación



Despiece constructivo: detalle de tubo pilar con estructura de lona

### Conclusiones

El estudio realizado muestra la posibilidad de realizar estructuras para programas temporales con tubos de cartón de desecho y con caña tacuara nacional. Dejamos abierta la necesidad de definir con mayor profundidad y extensión dichas posibilidades, así como parámetros de diseño adecuados a los materiales.

Realizamos búsquedas en el plano del diseño que mostraron la viabilidad de las estructuras para programas temporales realizadas con materiales no habituales en nuestro medio y obtuvimos potencialidades significativas para el desarrollo de sistemas constructivos asociados a la caña tacuara y a los tubos de cartón. Estas conclusiones, surgidas de haber explorado el diseño, los materiales y los sistemas constructivos en referencia a los conceptos de eficiencia estructural y de sustentabilidad, muestran posibilidades concretas en relación a estos dos materiales y sugieren múltiples posibilidades similares para otros materiales que podrán resultar en nuevas líneas de búsqueda.

Sintetizamos algunos de los resultados de nuestros ensayos realizados en el Laboratorio del IC de la Facultad de Arquitectura:

Tensión de rotura en compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad (MPa)			
	$\sigma_{\text{medio}}$	$\sigma_k$	Módulo de elasticidad
Tacuara Uruguaya	53	42	190.800
Tubos deCartón	37.5	33.7	155.430

Consideramos significativos los resultados obtenidos desde el punto de vista cualitativo, que era el objetivo perseguido. Un análisis estadístico completo requeriría un mayor número de ensayos y el estudio de la influencia de algunos factores en los resultados, como el origen geográfico o la edad de las probetas de caña.

Concluimos que las propiedades estructurales de la caña tacuara nacional son buenas, mejores que las de las maderas de reforestación como el pino y el eucaliptus. Las probetas con nudos arrojaron valores levemente inferiores en cuanto a su capacidad resistente a la compresión paralela a la fibra y en ello deberá profundizarse. La presencia de fisuras por secado no debería producir alteraciones significativas de las propiedades mecánicas.

Por otra parte deberá tenerse en cuenta en el diseño de estructuras con caña la protección adecuada contra agentes atmosféricos y bacteriológicos.

Las propiedades estructurales de los tubos de cartón —desechados en nuestro medio— resultaron ligeramente inferiores a las de los estudiados en la bibliografía internacional, pero sin duda consideramos que es un material apto para ser utilizado en estructuras de programas temporales.

## 9. Bibliografía

- CARDELLACH, Félix, *Filosofía de las estructuras*, Barcelona, Editores Técnicos Asociados S.A., 1970.
- CARDOSO, Rubens (Junior), *Arquitectura con bambú*, tesis UFRGS, PROPAP.
- CERVERA, Jaime, *Forma y esfuerzos estructurales*, Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid, Madrid, 2002.
- FULLER, Buckminster, *Design Science, an economic succes of all humanity*, en *Zodiaz* 19, Milán, 1969.
- GORDON, J. E., *Estructura o por qué las cosas no se caen*, Madrid, Calamar Ediciones, 2004.
- LÓPEZ MUÑOZ, Luis Felipe, *Diseño de uniones y elementos en estructuras de guadua*.
- LYALL, Sutherland, *Maestros de la estructura. La ingeniería en las construcciones innovadoras*, Barcelona, Editorial Blume, 2002.
- MONTANER, Josep Maria, *Las formas del siglo XX*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A., 2002.
- MORÁN URBIDA, Jorge A, *La arquitectura del bambú en América*.
- OTTO, Frei, *Finding Form, towards and architecture of the minimal*, Munich, Editorial Axel Menges, 2006.
- PREMIO ARQUISUR DE INVESTIGACIÓN 2006, Asociación de Facultades y Escuelas de Arquitectura Pública del mercosur.
- RÁPALE, MORAS DE VASCONCELLOS, *Bambúes en Brasil, una visión histórica y perspectivas futuras*.
- REVISTA QUADERNS, *Las escalas de la sostenibilidad*, Marzo 2000.
- RICE, PETER, *Mémoires d'un ingénieur*, Paris, Editorial Le Moniteur, 1998.
- RILEY, TERENCE, *Light construction. Transparencia y ligereza en la arquitectura de los 90*, Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A., 1996.
- SHIGUERU BAN, Matilda McQuaid, Phaidon .
- TARRAGÓ, SALVADOR, «Entre la estructura y la forma», en: *A+U* n° 86, 1977.
- TIMOSHENKO, STEPHEN, *History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures*, Nueva York, Editorial McGraw Hill, 1953.
- *Resistencia de materiales*, Madrid, Editorial Espasa Calpe, (Versión en castellano de Tomás Delgado Perez de Alba.), 1967.
- *Theory of plates and shells*, Nueva York, Editorial McGraw-Hill, 1959.
- TORROJA, EDUARDO, *Las estructuras de Eduardo Torroja*, CEDES y CEHOPU, Madrid, Ministerio de Fomento, 1999.

### Sitios web:

SBA\_EXPO Japan Pavillion.htm  
works- papers tube structures  
japan pavillion, expo 2000 hannover, Germany, 2000.

SBA\_Paper Dome.htm  
PAPER DOME- Osaka -cho, Gifu, Japan, 1998.

CICB\_Boathouse.htm  
Centre d'interpretation du canal de bourgogne - Pouilly-en-Auxois, France, 2005.

