UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE ARQUITECTURA

Maestría en Arquitectura

TECHUMBRE ALTERNATIVA DE BAMBU

Prototipo para la vivienda autogestionada del estado de Yucatán

Tesis presentada por

Carlos Hueman Uribe Guzman

Becario CONACYT No 335917

Para obtener el grado de Maestro en Arquitectura

Merida Yucatán Mèxico

2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE ARQUITECTURA

Maestría en Arquitectura

TECHUMBRE ALTERNATIVA DE BAMBÚ

Prototipo para la vivienda autogestionada del estado de Yucatán

Tesis presentada por:

Carlos Hueman Uribe Guzmán

Becario CONACYT No. 335917

Para obtener el grado de Maestro en Arquitectura

Mérida, Yucatán, México

2011

ÍNDICE

Tutor: **Dr. en Ing. Roberto de la Cruz Centeno Lara.**

Asesor interno: **Dr. en Arq. Raúl Ernesto Canto Cetina.**

Asesor externo: **Ing. Dr. en Gestión Estratégica Miguel Ángel Cerón Cardeña.**

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. en Ing. Roberto Centeno Lara (FIUADY) por su tiempo, apoyo, asesoría, ayuda técnica, ayuda teórica, por su paciencia y su tolerancia, así como por procurar siempre estar en sintonía a pesar de nuestra diferencia en la formación profesional. De igual modo por sus charlas en las que, de manera simple pero concisa, me hizo seguir siempre la ruta hacia mi objetivo.

Al Dr. en Arq. Raúl Canto Cetina (FAUADY), por su apoyo, asesoría y disposición durante el desarrollo de mi documento, así como por haberme dado las primeras pistas en relación al uso del bambú en la construcción sustentable.

Al Ing. Dr. en Gestión Estratégica Miguel A. Cerón Cardeña (FIUADY), por su tiempo y asesoría durante la elaboración de mi documento final, así como por todas sus recomendaciones técnicas en cuanto al bambú y la madera.

Al Ing. Francisco Javier Duarte Gómez (FIUADY) por su disponibilidad, asesoría técnica y constructiva, por su ánimo y disposición a ayudarme en todo momento durante la obtención del material, la construcción y las pruebas mecánicas de mi sistema de techumbre.

A los técnicos Alvar Nadal Martínez y Randy Valencia Euán (FIUADY) por estar siempre disponibles y dispuestos a ayudarme en todo momento desde el primer hasta el último día de mi estancia en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería. La convivencia con ellos hicieron muy ameno el trabajo.

Al Dr. Mauricio Gamboa Marrufo (FIUADY) por su asesoría y soporte durante las pruebas aerodinámicas en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería.

A los profesores del laboratorio de concreto (FIUADY) por su apoyo durante la construcción y pruebas de mi sistema de techumbre, así como por darme total acceso al uso de las herramientas e instalaciones del laboratorio.

Al Arq. Alfredo Alonzo Aguilar, M. en C. (FAUADY) por estar siempre al pendiente de los avances y cumplimiento de las metas, tanto mías como las de mis compañeros de maestría.

Al Sr. Jeremy E. Faulk (Bambú Xixim) por su interés en mi investigación al otorgarme todo el bambú que requerí para el desarrollo de la misma.

Al Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza (CICY) y a su tutorado, el Br. Juan Sebastián Couoh Nah, por su disponibilidad, apertura e interés en mi tema de investigación, por facilitarme el acceso a la alternativa de membrana impermeable de tela con barniz de poliestireno reciclado, así como en el desarrollo de nuevas tecnologías que dañen menos al planeta.

A mis compañeros de maestría: Jacky Tapia, Rafael Lara, Briseida Corzo, Lilian Góngora, Andrea Cordero, Héctor Cabañas, Cecilia Azueta, Luis Llovera, Víctor Ley, Víctor Castilla, Marco Magaña y Mercedes Luna por formar un grupo unido y por demostrar siempre su apoyo y fe en mi tema de investigación.

Al CONACYT por otorgarme el apoyo económico mediante su programa de becas, gracias al cual fomenta el desarrollo científico y tecnológico nacional.

RESUMEN

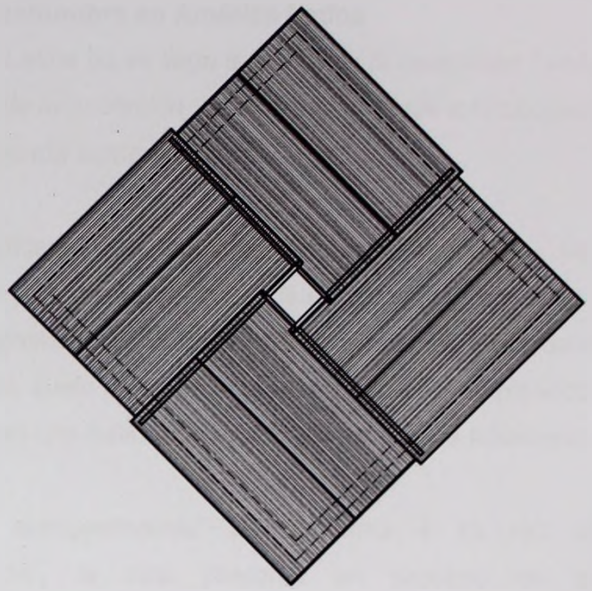
Dentro de los principales problemas de vivienda identificados a nivel internacional, nacional y local, el tema de la techumbre en la vivienda autogestionada se ubica como uno de los principales temas a resolver, debido a que por lo general su solución más inmediata se lleva a cabo mediante el uso de materiales poco adecuados y/o perecederos que no ofrecen las condiciones mínimas de seguridad, durabilidad y confort, por mencionar algunas. En este sentido, y dentro del marco de la Tecnología Constructiva y Ambiental, se desarrolla un Sistema de Techumbre Alternativo a base de Bambú, aplicable a la vivienda autogestionada en el estado de Yucatán, que procura satisfacer las condiciones mínimas de seguridad, facilitar su elaboración a través de la autoconstrucción, impactar lo menos posible al medio ambiente, considerando incluso adquirir la cualidad de ser reutilizable.

El desarrollo de este sistema de techumbre alternativo parte de una revisión de fundamentos teóricos relacionados con el uso de recursos renovables, el desarrollo sustentable, la arquitectura sustentable, la ecología, la bioconstrucción, las tecnologías apropiadas entre otros. En este contexto, el bambú se presenta como un material que posee cualidades constructivas y ecológicas dignas de ser tomadas en cuenta en el desarrollo de tecnologías alternativas para la vivienda. Dicho material, así como el sistema de techumbre desarrollado fueron sometidos a diversas pruebas físicas en laboratorio así como a diversos análisis comparativos con otros sistemas de techumbre comúnmente empleados en la vivienda autogestionada, con la finalidad de determinar su viabilidad y factibilidad de uso e implementación.

Los resultados obtenidos arrojaron características cualitativas y cuantitativas relacionadas con los objetivos establecidos y con los

conceptos planteados en el marco teórico, cumpliendo con los atributos de seguridad, autoconstructibilidad y bajo impacto ambiental, con los que se concluyó la viabilidad y factibilidad del desarrollo de sistemas de techumbre de bambú a nivel local.

Dado que este proyecto de investigación se enfocó únicamente en un sistema de Techumbre, cabe recomendar el desarrollo de más investigaciones relacionadas con otros elementos constructivos de bambú que sean aplicables al contexto regional tales como estructuras, muros, uniones. Por otra parte, el cultivo del bambú, así como la transferencia tecnológica hacia aquellos sectores socioeconómicos con mayores carencias, resultaría un tema importante a desarrollar, considerando la probabilidad de establecer un nuevo sistema constructivo de mayor accesibilidad a nivel local.



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

PROBLEMÁTICA DE LA TECHUMBRE

Vivienda y techumbre en América Latina

"En América Latina no se llega a satisfacer la necesidad habitacional de la mayor parte de la población, de forma que acude a la ocupación ilegal del suelo y la vivienda autoproducida"[1].

Puede identificarse que las ciudades latinoamericanas se encuentran conformadas por "dos tipos" distintos de ciudades: la ciudad "formal" y la ciudad "autogestionada", siendo esta última la más afectada debido a que por lo general, suele ubicarse en zonas de riesgo, empleando tecnologías que no ofrecen una adecuada protección contra los fenómenos naturales.

La "ciudad autogestionada" se conforma a su vez de "vivienda autogestionada", la cual presenta un proceso de consolidación conformado por tres fases, iniciando con la edificación de una vivienda precaria con materiales de fácil adquisición, los cuales se van sustituyendo en la búsqueda de una vivienda más sólida y estable, hasta que finalmente se terminan por mejorar los elementos constructivos (muros y cubiertas), así como las instalaciones (Gálligo, 2005)

En este contexto, la identificación de la techumbre como una de las principales problemáticas de la vivienda autogestionada en Latinoamérica, es un tema que ha impulsado diversos trabajos de investigación, ya que a pesar de ser éste el elemento esencial para la protección contra las inclemencias del tiempo, fenómenos naturales y atmosféricos, y poseer

[1] Ruiz Sabido, Rubí Elina, 2000, **La vivienda marginal como fenómeno cultural**, Revista Cuadernos de arquitectura de Yucatán No. 13, pp.12-18.

además un valor simbólico en la generalidad de las sociedades, en muchas ocasiones es también el elemento que implica la mayor inversión económica y complejidad constructiva[2], por lo que en la mayoría de las ocasiones es conformado con materiales inadecuados:

"*En América Latina el tener un techo representa tener un lugar para vivir, sin importar muchas veces la calidad del mismo.* (...) *En algunos casos la falsa idea de modernidad conlleva a la sustitución de tecnologías tradicionales de calidad por soluciones generalizadas que en ocasiones causan problemas*". [3]

Vivienda y techumbre en México

"*En México (...) enormes cantidades de población (...) resuelven su necesidad básica con viviendas precarias*". (Ruiz Rubí, 2000)

Particularmente en México, la techumbre forma parte de uno de los problemas prioritarios en materia de vivienda, y esto queda evidenciado en un documento emitido por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) el cual afirma que en la vivienda por autoconstrucción, "*aún no se ha encontrado una techumbre que pueda garantizar a sus habitantes mayor seguridad, durabilidad, economía y confort*".[4]

Lo anterior se ha definido en el marco del Programa Nacional de Vivienda 2008-2012: "Hacia un Desarrollo Habitacional Sustentable", que prevé entre sus objetivos "*Impulsar el desarrollo habitacional sustentable*"[5].

---

[2] Gálligo, Pedro (coordinador), 2005, **Un techo para vivir. Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina**, Varios países, CYTED y otros. 559pp.

[3] Ibíd.

[4] Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONACYT, 2009, **Convocatoria CONAVI-CONACYT 2009-01**, México.

[5] Ibíd.

Por otra parte, es importante considerar que:

"*El techo, a diferencia de los otros elementos de la vivienda, requiere de un sistema constructivo especial. (...) Las soluciones tradicionales de la construcción autogestionada (como el uso de lámina metálica, de asbesto o de cartón) plantean problemas básicos de aislamiento térmico, durabilidad. Estanquidad (aislamiento) y permeabilidad*". (Gálligo, 2005)

La techumbre en Yucatán

"*En Mérida (...) la vivienda ha sido afectada por las contradicciones del proceso de industrialización y urbanización que caracterizan a una economía dependiente*". (Ruiz Rubí, 2000)

En el estado de Yucatán, se observa la misma problemática, tanto en la vivienda ubicada en los asentamientos irregulares en la periferia de la ciudad, como en la vivienda del ámbito rural. Si bien el fenómeno de la autoconstrucción en Latinoamérica (incluyendo la techumbre) se llevaba a cabo tradicionalmente en zonas rurales, desde la década de los 1970's dicho fenómeno comienza a extenderse en el ámbito urbano[6].

Por otro lado, no debemos olvidar que en nuestro contexto regional, la casa tradicional maya se caracteriza, entre otras cosas, por llevarse a cabo mediante autoconstrucción, sin embargo, la aspiración a una casa de materiales industrializados, sumado a la poca disponibilidad de los materiales tradicionales (en este caso el *huano*), lleva a sus usuarios a dejar de lado las tecnologías basadas en recursos renovables por otras más baratas y de origen industrial, influido esto por la expansión del

[6] Salas, Julián, **Contra el hambre de vivienda, soluciones tecnológicas latinoamericanas**. CYTED. Edit. ESCALA, Bogotá, Colombia, 1992. 312pp.

comercio de materiales económicos como la lámina de cartón o la lámina metálica, los cuales ofrecen menor durabilidad y confort[7].

Este fenómeno se ha visto trasladado al ámbito urbano a tal punto que dichos materiales han conformado un común denominador de la vivienda autogestionada.

Vivienda autogestionada: proceso de consolidación

Lucía Tello, señala tres etapas en el proceso de consolidación de la vivienda marginada, en las cuales la techumbre es el elemento que más tiempo requiere para su propia consolidación: "*... así, los muros suelen ser de block... mientras que las techumbres suelen ser de lámina de asbesto o cartón,...madera, lámina metálica, huano... etc.*" (Tello, en Ruiz 2000).

Por su parte, Carmen García (2003) identifica, en las periferias de la Ciudad de Mérida, un proceso de consolidación el cual inicia con la construcción de un cuarto provisional de cartón al cual le sigue un cuarto permanente de block, "*Sin embargo, el carácter consolidado o permanente de una vivienda implica generalmente un proceso de varios años*".[8]

---

[7]Pérez Medina, Susana , 1993, **Transformación de la vivienda rural en Yucatán: estudios de caso**, Cuadernos de arquitectura de Yucatán, No.6, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de arquitectura, otoño, pp.38-45.

[8] García, Carmen, Angélica Quiñones, (2003), **...Y sin embargo se vive. De la infravivienda a la vivienda urbana en Mérida Yucatán, México**. en Scripta Nova, Revista electrónica de geografía y ciencias sociales, Universidad de Barcelona. Vol. VII, núm. 146(143), 1 de agosto de 2003.

Vivienda autogestionada: materiales para las techumbres

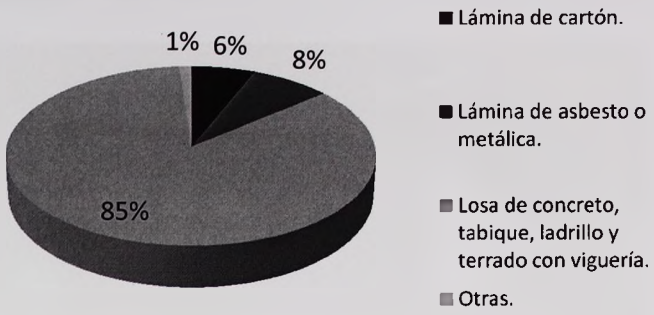
En este sentido, cabe hacer énfasis en la conformación material de la vivienda autogestionada, y la presencia constante de materiales poco adecuados para la construcción de la techumbre (Imagen No.1).

Imagen No.1: Proceso de consolidación de la vivienda autogestionada.

Fuente: http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146(143).htm#_ednref15

Haciendo referencia a datos del INEGI en 2005, se puede observar que tanto en Mérida, como en sus principales municipios colindantes, el material más usado después del concreto y el acero en la conformación de las techumbres en la vivienda (85%), son la lámina de asbesto y lámina metálica (8%) y la lámina de cartón (6%). (Gráfica No.1).

Gráfica No.1 Materiales de los techos en las viviendas de Mérida y municipios fronterizos. (Fuente, INEGI 2005)



Programas de vivienda

Por otro lado, en materia de vivienda autogestionada, a la fecha no se ha identificado en el Estado algún programa institucional enfocado particularmente al tema de la techumbre; al respecto, el gobierno estatal a través del Instituto de Vivienda del Estado de Yucatán (IVEY), llevó a cabo, de enero a marzo de 2009, un programa de vivienda emergente como alternativa a la vivienda construida con materiales de desecho:

"Con Vivienda Emergente, en vez de las frágiles y riesgosas láminas de cartón, estas familias disponen de mejores condiciones de vida, principalmente los infantes, tanto en higiene como en seguridad".[9]

Cabe señalar que esta vivienda se encuentra "*construida en una superficie de 24 metros cuadrados y una altura de 2.44 metros integrada con paneles construidos con un bastidor de perfil de acero y lámina*

[9] IVEY Informe trimestral de actividades, Enero-Marzo de 2009.

acanalada, modulada de tal manera que la colocación de los paneles no está limitada a una sola posición, lo que la hace de un diseño muy versátil pudiendo colocar la puerta y las ventanas en la posición y orientación más adecuada"[10] (Imagen No.2).

Imagen No.2: IVEY, programa "Vivienda emergente" (febrero de 2009).
Fuente: http://www.ivey.yucatan.gob.mx/transparencia/Informe_1er_Trimestre_2009.pdf

MEDIO AMBIENTE Y VIVIENDA

En materia de medio ambiente y desarrollo sustentable, puede considerarse que, tanto en la vivienda construida en serie, como en la consolidación de la vivienda autogestionada, el uso de materiales producto de la industria de la construcción generan una fuerte dependencia económica y tecnológica hacia esta industria la cual, para su funcionamiento depende de recursos no renovables, principalmente los combustibles fósiles, cuyo uso genera fuertes emisiones contaminantes,

[10] Boletín IVEY del 17 de Febrero de 2009 en [http://notisureste.com/noticias/imprimir1744.html]

entre ellas dióxido de carbono (CO_2), gas de efecto invernadero considerado como uno de los principales causantes del calentamiento global.

Es importante tener en cuenta que la industria de la construcción es una de las más contaminantes del planeta, y si bien no puede negarse la importancia de construcción de vivienda en países en desarrollo, "*el crecimiento desmedido se ha traducido en diversos problemas, no solo de transporte, energía desechos y reservas de agua, sino también en los ecosistemas y en el espacio disponible para la agricultura*"[11]

Por otro lado, el uso de materias primas renovables en el desarrollo de vivienda ha caído en desuso, tanto por la escasez de dichos materiales, como por la aspiración a una casa de materiales industrializados.

En este sentido, se presenta la necesidad de emplear materiales y sistemas alternativos que ayuden a minimizar el impacto ambiental de modo que, en un futuro no muy lejano puedan ser considerados como los nuevos recursos constructivos de uso convencional.

Techumbre convencional: Sistema de vigueta y bovedilla

Si bien en el estado de Yucatán existe una diversa gama de materiales para la construcción de techumbre, es también cierto que dicha variedad se ha vista reducido a unos pocos ejemplos que han demostrado tener aceptación popular, y cuyo empleo se ha vuelto paradigmático; es así que el block, la vigueta y la bovedilla han pasado a ser los materiales con mayor demanda en la industria de la construcción conformando los dos últimos el sistema de techumbre convencional, seguidos por materiales de uso "emergente" empleados en la vivienda autogestionada tales como

[11] K.Ghavami, 1995, "Bamboo: Low cost and energy saving construction materials", en Yan Xiao, Masafumi Inoue y S.K. Paudel (eds.), **Modern Bamboo Structures**, Changsha, China, Octubre 2007.

la lámina de cartón y la lámina galvanizada, quedando en última instancia la techumbre hecha a base de ramas y guano (o "*huano*"), ó zacate, empleadas en la construcción de la vivienda maya tradicional.

Si consideramos que las viguetas y las bovedillas son hechas a base de los dos materiales de la industria de la construcción cuya producción es de las que más emisiones contaminantes implica (cemento y acero), podemos obtener así un panorama general en el que los materiales industrializados, producto del uso de recursos no renovables, van ganando terreno por sobre su contraparte, los materiales renovables, principalmente vegetales, cuyo uso ha disminuido debido, entre otras cosas, a la falta de una cultura general de reforestación, lo que impide que su explotación pueda ser llevada a cabo de un modo sustentable.

A lo anterior puede sumarse además que, ya desde 1988, FONAHPO establecía la importancia de considerar los incrementos periódicos en los materiales convencionales de construcción, los cuales se encuentran sujetos a factores aún más complejos de determinar y analizar.

Bioconstrucción y bambú

Si bien la bioconstrucción (conocido también como "baubiología") estudia la relación del ser humano con su entorno construido fundamentándose en principios establecidos, que a su vez incluyen diversos aspectos relacionados con la construcción, su empleo en este trabajo se basa en aquellas características que la hacen compatible con la problemática planteada, tales como el ahorro energético y la salud ambiental, así como su relación con los materiales de construcción naturales que no fomenten la explotación de materias primas escasas o peligrosas.

En este sentido, se dará énfasis a temas tales como:

- El empleo de materiales de origen vegetal.
- La convergencia de tecnologías actuales con las ancestrales.
- El empleo de materiales de bajo impacto ambiental.
- La autoconstrucción.
- El reciclaje.

Por su parte, el empleo del bambú en la construcción es una tecnología probada en diversos contextos, tanto nacionales como internacionales. Sus propiedades mecánicas y su versatilidad de uso, así como sus diversos efectos positivos al medio ambiente, le han otorgado un lugar importante dentro de las actuales tecnologías constructivas alternativas.

Considerando que actualmente la disponibilidad de recursos vegetales renovables para su uso en la construcción de vivienda no se restringe solamente a especies locales de cada región, el empleo del bambú como materia prima para la construcción de techumbres se plantea como una posible alternativa al cumplir con cualidades constructivas comprobadas empíricamente a nivel local y prácticamente a nivel nacional e internacional, considerando además que su cultivo relacionado con la construcción se ha llevado a cabo en la península desde 1996, contando actualmente con 25 hectáreas de cultivo, lo cual hace viable su aplicación en la construcción de vivienda al vislumbrarse una producción de material a gran escala.

Por lo anterior, el tema de la techumbre plantea la necesidad de ser no solamente identificado y estudiado, sino también abordado de tal modo que puedan ser generadas propuestas especificas que planteen diversas alternativas de solución, acordes con las características de cada región, que cumplan con las características básicas de seguridad, durabilidad, confort y facilidad en la construcción, y que su desarrollo no tenga repercusiones negativas sobre el medio ambiente.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible diseñar una alternativa de techumbre de bambú, que sea segura, autoconstruíble, que no implique un impacto ambiental negativo y sea adaptable a las condiciones medioambientales locales?

HIPÓTESIS

"Dada su disponibilidad, resistencia, ligereza, economía de producción y bajo impacto ambiental, es factible y viable desarrollar con bambú un sistema de techumbre adecuado para la localidad, que sea eficiente, seguro e independiente de la industria de la construcción local y nacional".

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de techumbre alternativa para la vivienda autogestionada del Estado de Yucatán, empleando como material base el bambú, que cumpla con los atributos de seguridad y autoconstructibilidad, cuyo desarrollo no implique un impacto ambiental negativo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las cualidades mecánicas del bambú de la especie *dendrocalamus strictus.*

- Comparar las cualidades mecánicas del bambú de la especie *dendrocalamus strictus* con las de otras especies de bambú y con las de

otros materiales comúnmente usados en la construcción, y determinar ventajas y desventajas.

- Determinar la viabilidad del uso del bambú de la especie *denstrocalamus strictus* en la construcción de un sistema de techumbre a nivel local.

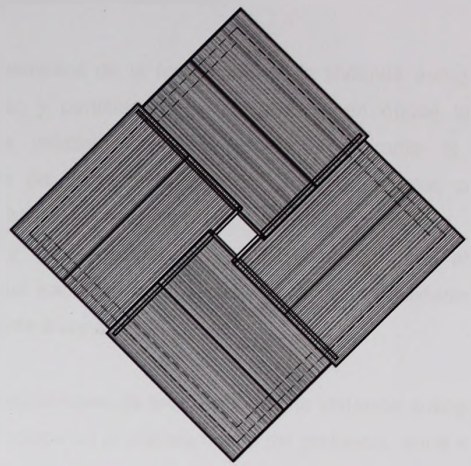
- Diseñar y construir un sistema alternativo de techumbre (prototipo) con el bambú disponible en la región.

- Determinar la seguridad mecánica y la autoconstructibilidad del sistema de techumbre desarrollado.

- Comparar algunas características del sistema de techumbre desarrollado con las de otros sistemas de techumbre comúnmente usados en la vivienda autogestionada y determinar las ventajas desventajas.

- Determinar el impacto ambiental y la economía del sistema de techumbre desarrollado.

- Evaluar cualidades y defectos del sistema desarrollado.



CAPÍTULO 1

Marco teórico

CAPÍTULO 1
MARCO TEÓRICO

1.1 TECHUMBRE ALTERNATIVA

Ante la problemática de la techumbre en la vivienda autogestionada en Latinoamérica, y particularmente en México, en donde los materiales generalmente utilizados para la techumbre durante el proceso de consolidación de la vivienda resultan poco adecuados por presentar problemas básicos tales como aislamiento térmico, durabilidad, aislamiento y permeabilidad,[1] la posibilidad de una alternativa de techumbre que satisfaga tanto estas, como otras cualidades, resulta un tema importante a considerar.

Sistemas tradicionales de techumbre en la vivienda autogestionada

Como se menciona en el planteamiento del problema, entre los materiales más recurridos en el desarrollo de la techumbre se encuentran la lámina de cartón, la lámina de asbesto, la lámina metálica, además de diversos materiales de desecho. Estos materiales, si bien cumplen con la necesidad primaria de dar refugio y protección contra la intemperie, no cumplen con otras tantas características consideradas básicas tales como seguridad, durabilidad, economía y confort[2]. Si, por un lado, "*...los techos de lámina de cartón son evidentemente inapropiados en cuanto a durabilidad y habitabilidad*"[3], por el otro "*...los techos de lámina de asbesto presentan problemas de colocación (para la autoconstrucción) y su costo es alto para los elementos que no requieren estructura de soporte*"[4].

---

[1] Gálligo (2005)

[2] CONAVI (2009)

[3] Erazo, Enrique, Roberto Meli, 1978, **Sistemas de techo para autoconstrucción**, UNAM, México pp.3-5

[4] *Idem.*

Carlos González Lobo (1998) por su parte, menciona que la solución "pobre" a la techumbre en las ciudades "*generalmente es de láminas de desecho, cartón asfáltico, lámina acanalada de zinc sobre listones de madera (...). Con esto el techo es sumamente "provisional", no es higiénico y aún es costoso. Un temporal, un sismo o fuerza pública los deshacen fácilmente*"[5].

Por otro lado, los sistemas de techumbre desarrollados a partir del uso del cemento y el acero (losa armada, vigueta y bovedilla, etc.) si bien cumplen total o parcialmente con las características básicas antes mencionadas, al día de hoy pueden ser considerados dependientes de procesos industrializados cuya demanda energética se basa en el uso del petróleo.

Es así que se plantea la necesidad de alternativas tecnológicas apropiadas y apropiables, que satisfagan la necesidad de techumbre de la vivienda autogestionada cumpliendo con las características básicas antes mencionadas, que sean independientes de la actual industria de la construcción, que su fabricación no implique impactos negativos al medio ambiente, y tengan la posibilidad de ser autoconstruidas.

Contexto internacional

Ante esta necesidad, debe mencionarse que desde hace ya varios años se han llevado a cabo en diferentes países, diversas alternativas de techumbre a través de tecnologias alternativas y materiales sustentables, ya sean procesados o naturales. Algunos ejemplos son: el "Sistema Beno" en Argentina, a base de "cerámica armada" (Imagen 1.1), el "Domocaña" en Perú, que emplea una cúpula auto portante conformada de caña y recubierta con una mezcla de cemento (Imagen 1.2), y el panel prefabricado "Ecoplak" en Colombia, que emplea materiales reciclados

[5] González Lobo, Carlos, 1998, **Vivienda y ciudad posibles**, Coedición ESCALA – UNAM, Colombia- México 229p.

producto de cartones *tetrapack*, el cual puede emplearse también en muros y pisos (Imagen 1.3).

Imagen 1.1 Sistema "Beno" de cerámica armada, Argentina

Fuente: Gálligo 2005, "Un techo para vivir"

Imagen 1.2 Sistema "Domocaña", Perú

Fuente: Gálligo 2005, "Un techo para vivir"

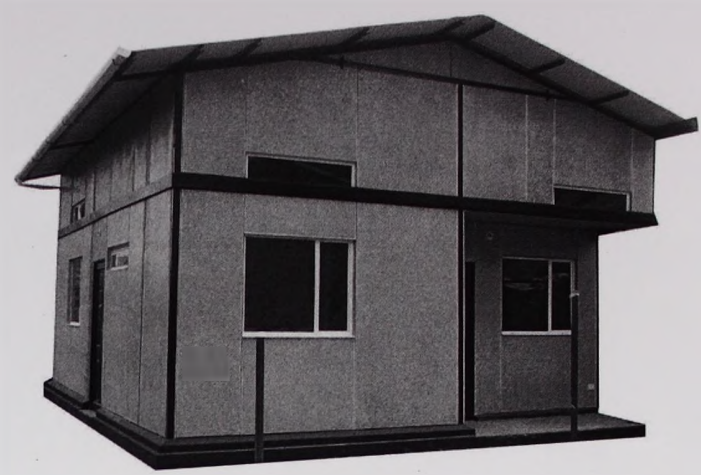


Imagen 1.3 Sistema "Ecoplak", Colombia

Fuente: http://www.riorion.com.co

Uso del bambú en el contexto internacional

Por otro lado, el uso del bambú para la solución de techumbres, de vivienda, y de proyectos en general, es también una realidad que se manifiesta en diferentes partes del mundo, desde las cubiertas base a dos aguas, hasta las que se componen diversas geometrías complejas como los paraboloides hiperbólicos. Algunos ejemplos son las estructuras el pabellón ZERI, obra del Arquitecto colombiano Simón Vélez (Imagen 1.4), la estructura de cubierta auto portante diseñada por la Arq. Clara Angel (Imagen 1.5), la cubierta a flexo-compresión del Jardín de ñiños del Arquitecto Japonés Shoei Yoh (Imagen 1.5), o las estructuras "Origami" en China (Imagen 1.6).

Imagen 1.4 Pabellón ZERI, Colombia, Arq. Simón Vélez

Fuente: http://imageshack.us/f/62/pavellondeguadua02s7il.jpg/

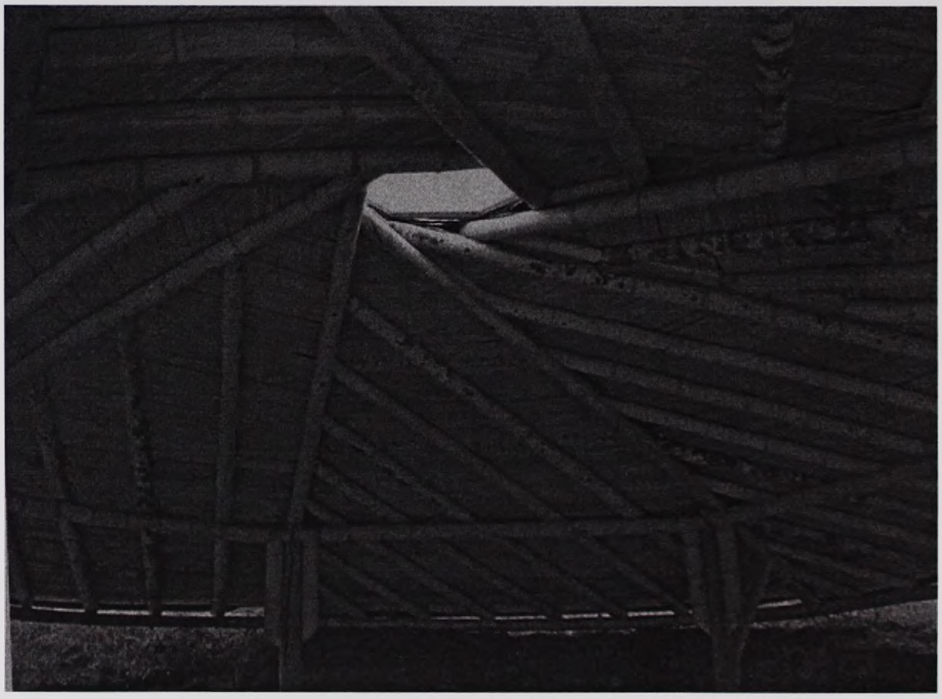


Imagen 1.5 Techo piramidal, Arq. Clara Angel

Fuente: Minke, Gernot, 2010, "Manual de construcción con bambú"

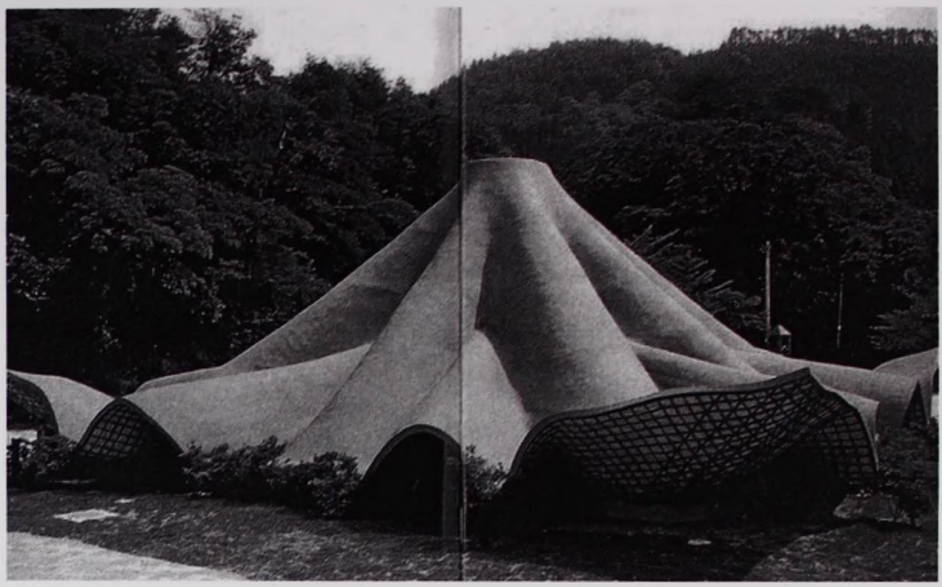


Imagen 1.5 Centro comunal y jardín de niños en Naiju, Japón, Arq. Shoei Yoh

Fuente: http://www.flickr.com/photos/32110929@N03/3004785956/

Imagen 1.6 Viviendas "Origami", China

Fuente: http://tec.nologia.com/2008/10/23/viviendas-origami/

Contexto nacional

En México se han llevado a cabo también diversas propuestas de techumbre alternativa en respuesta a las circunstancias de precariedad en que viven muchas familias, tanto en la ciudad y en las periferias, así como en el ámbito rural. Es de señalarse que esas propuestas se han venido desarrollando desde hace ya varios años, y en este sentido no siempre han sido independientes de los materiales industrializados como el concreto o el acero, aunque, por otro lado, han buscado obtener de ellos una mayor eficiencia y ventajas constructivas.

En 1978, los Ingenieros Enrique Erazo y Roberto Meli, ambos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), desarrollaron una investigación específicamente enfocada hacia sistemas de techo para la autoconstrucción. Dentro de sus propuestas se encontraban cubiertas ligeras hechas a base de cemento y acero (Imágenes 1.7 y 1.8), que si bien no tenían un enfoque primordialmente ecológico, sí buscaban reducir costos y ofrecer una techumbre alternativa accesible a un mayor sector de la población.[6]

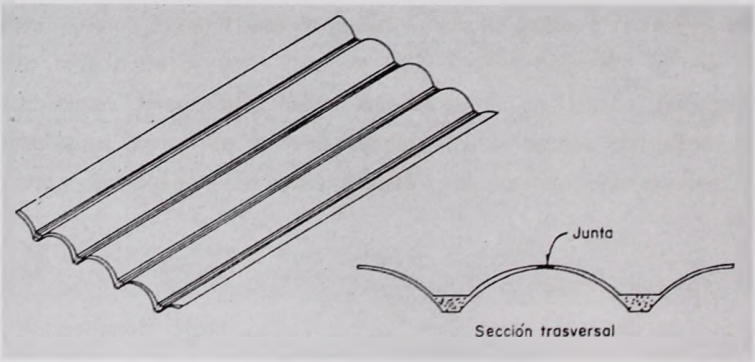


Imagen 1.7 Bóveda cilíndrica

Fuente: Erazo, Enrique, "Sistemas de techo para autoconstrucción" México 1978

[6] Erazo (1978)

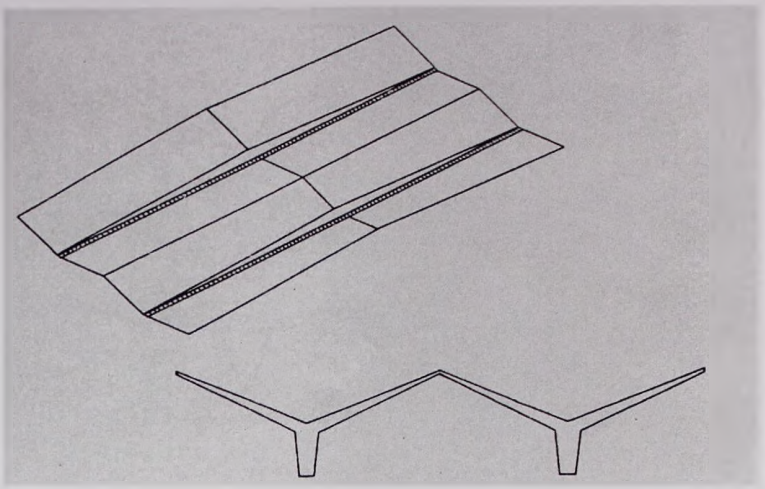


Imagen 1.8 Doble "Y" de peralte variable

Fuente: Erazo, Enrique, "Sistemas de techo para autoconstrucción" México 1978

Por otro lado, se han seguido desarrollando propuestas de techumbres, algunas bajo la línea de buscar una mayor eficiencia en el manejo de los materiales industrializados, como las estructuras de malla isótropas del Arq. Francisco Montero por parte de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) a base de varillas y malla de gallinero, recubierto con una mezcla de cemento (Imagen 1.9), u otras buscando el uso de tecnologías intermedias como las cubiertas de ladrillo recargado empleadas por el Arq. Alfonso Ramírez Ponce, hechas con ladrillo de barro y cemento para sus juntas (Imagen 1.10), por mencionar algunas.

Imagen 1.9 Estructura de Mallas isótropas, UAM, México

Fuente: Gálligo 2005, "Un techo para vivir"

Imagen 1.10 Cubiertas de ladrillo recargado, Arq. Alfonso Ramírez Ponce

Fuente: http://www.arponce.itgo.com/images/f26.jpg

Uso del bambú en el contexto nacional

En cuanto al uso del bambú en México, existen sistemas constructivos de vivienda que emplean el bambú como elemento base, ya sea como parte de un sistema tradicional de construcción[7] (Imagen 1.11) o como tecnología alternativa, como la desarrollada en Puebla en un curso de capacitación impartido en San Sebastián Tlacotepec (Imagen 1.12), o en Veracruz como parte del "Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico para el Fomento de Producción y Financiamiento de Vivienda y el Crecimiento del Sector Habitacional" (Imagen 1.13), sin embargo, para la solución específica de la techumbre en el contexto nacional, no se identificó algún sistema desarrollado con este fin.

Imagen 1.11 Vivienda de bambú. México

Fuente: Cortés, Gilberto, 2005"Viviendas de bambú en Mexico", en www.bambumex.org

[7] *"Usar el bambú para construir viviendas en México no es ninguna novedad, es una costumbre utilizada por numerosos pueblos, mucho antes de la conquista. Los totonacas en Veracruz, los huastecos en Hidalgo y Tamaulipas, los aztecas y teotihuacanos en el centro de México, y los Maya-Chontales en Tabasco, han construido casas y lo siguen haciendo aun en estos dias".* Cortés, Gilberto, "Viviendas de bambú en México", 2005, [www.bambumex.org]

Imagen 1.12 Vivienda de bambú en Villa del Río, San Sebastián Tlacotepec, Puebla

Fuente: Curso de capacitación y construcción, Bambupue A.C

Imagen 1.13 Vivienda de bambú, Veracruz. México

Fuente: Bejarano López, Rafael, 2002, "Metodología para la construcción de vivienda utilizando como material principal el bambú"

Contexto local

En la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Yucatán (FAUADY), se ha llevado a cabo el desarrollo de tecnologías alternativas de techumbre como parte del programa de maestría. Los proyectos más recientes son un Sistema Modular de Techo Ligero que se compone de viguetas y bovedillas hechas a base de polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés), desarrollado por el Ing. Manuel Sánchez[8] (Imagen 1.14) y la posibilidad de rehusar el sistema constructivo de rollizos y bah' pek para la vivienda de bajo costo, a cargo del Arq. Adrian Contreras[9] (Imagen 1.15).

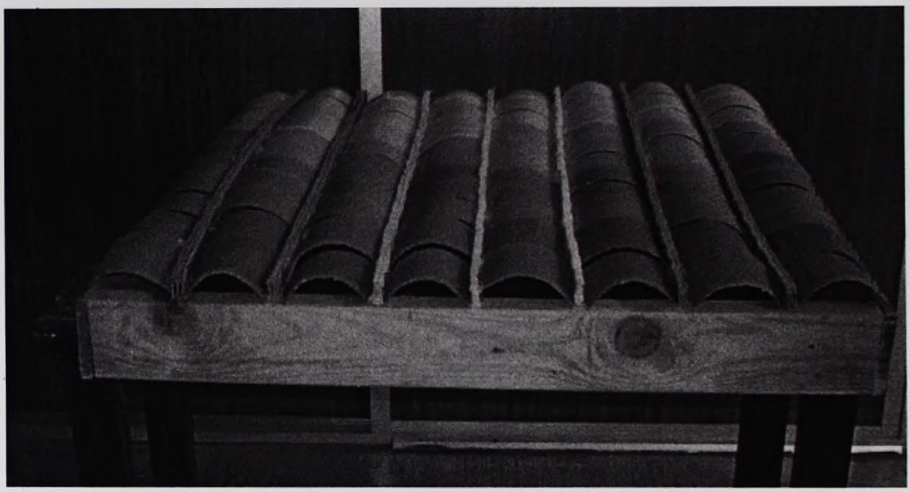


Imagen 1.14 Sistema Modular de Techo Ligero a base de HDPE

Foto: Manuel Sánchez, Tesis de maestría, 2010

[8] Sánchez Zapata, Manuel, 2010, **Tecnologías alternativas: innovación de un sistema modular de techo ligero para la autoconstrucción de la vivienda progresiva de la ciudad de Mérida, Yucatán**. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura.

[9] Contreras Manzanilla, Adrían, 2010, **Posibilidad de re-uso del sistema constructivo de rollizos y bah pek, como tecnología alternativa en la autoproducción de vivienda de bajo costo**. Tesis para obtener el grado de maestría en arquitectura, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura. Mérida Yucatán, México.

Imagen 1.15 Sistema de Rollizos y Bah' Pek

Fuente: Contreras, Adrian, Tesis de maestría, 2010

Uso del bambú en el contexto local

Si bien el uso del bambú en el contexto local no se ha enfocado particularmente al desarrollo de vivienda, éste puede encontrarse dentro de diversos proyectos de tipo residencial y turístico, ya sea como elemento decorativo ó constructivo; así mismo, se emplea en el diseño y construcción de muebles diversos. En estos proyectos el suministro, así como la asesoría técnica y mano de obra en la instalación del bambú ha sido aportado principalmente por la empresa Bambú Xixim, a cargo del Sr. Jeremy Faulk. (Imágenes 1.15, 1.16 y 1.17).

Imagen 1.15 Cobertizo de bambu, Chelem Yucatán

Fotografía: Jeremy Faulk

Imagen 1.16 Proyecto "Ecoparaíso", Celestún Yucatán

Fotografía: Jeremy Faulk

Imagen 1.17 Stand evento "Día de la tierra", Mérida Yucatán

Fotografía: Jeremy Faulk

1.2 VIVIENDA TIPO

Considerando que toda propuesta tecnológica requiere de un punto específico de aplicación, el desarrollo de la techumbre alternativa partirá de una vivienda ideal o "tipo", con base en las características generales identificadas como parte del proceso de consolidación de la vivienda autogestionada, en la cual se consolidan primero los muros de block de concreto dejando la techumbre para el final, tomando en cuenta las dimensiones generales señaladas por García y Tello:

"*En la primera etapa (...) se ocupan, en primer término, de construir una primera "edificación" con materiales perecederos. Generalmente consta de*

un cuarto de lámina de cartón y madera, o de los materiales que se tengan a la mano con medidas estandarizadas casi siempre de 5x4mts"[10].

"*... así, los muros suelen ser de block... mientras que las techumbres suelen ser de lámina de asbesto o cartón,...madera, lámina metálica, huano... etc.*"[11].

Por su parte, García (2003) menciona que: "*Un terreno tipo (...), que alberga el espacio para vivir. Éste se construye con distintos materiales según la fases de construcción-consolidación en que se encuentre, sin embargo, corresponde de manera general a módulo o cuarto tipo de 4.00 m x 4.00 m sin importar el material con que está construido*".

Es así que la "vivienda tipo" será considerada como un módulo o cuarto tipo, de 4 m x 4 m, y una altura promedio de 2.5 m, hecho con block de concreto (Imagen 1.18).

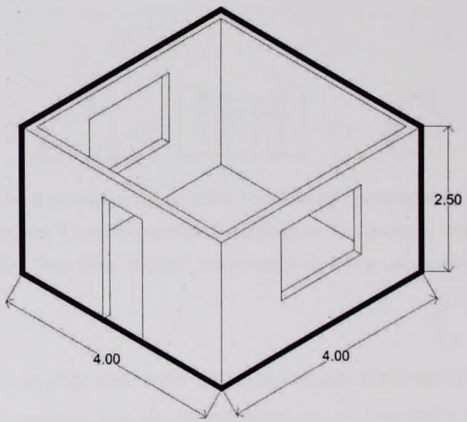


Imagen 1.18 "Vivienda tipo"

Dibujo: Carlos Uribe

[10] Tello, en Ruiz (2000)
[11] *Ídem*

1.3 RECURSOS NO RENOVABLES Y PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES

La economía de los materiales

En la actualidad, el uso de energías no renovables forma parte del paradigma productivo. La extracción, la producción, la distribución, el consumo y el descarte forman parte de un sistema conocido como "la Economía de los Materiales" descrito por Annie Leonard (2007) en su documental "The Story of Stuff" (La historia de las cosas). Este sistema se caracteriza por no reintegrar los desechos al ciclo natural, sino que simplemente los acumula, generando además en todo su desarrollo una gran cantidad de emisiones contaminantes, lo cual lo convierte en un sistema lineal e ineficiente. Dicho sistema pareciera funcionar adecuada e indefinidamente, sin embargo en los últimos años se ha observado que los efectos de esta creencia han alcanzado ya los "límites" del planeta, pues es imposible que un sistema lineal opere indefinidamente en un planeta finito. (Imagen No.1.19)

Imagen 1.19 Los 5 niveles en el sistema lineal de la Economía de los Materiales: Extracción, Transformación, Distribución, Consumo y Descarte

Fuente: "The Story of Stuff", documental de Annie Leonard (2007)

Es importante resaltar que este sistema incluye también a gran parte de los materiales empleados en la industria de la construcción, los cuales pueden considerarse inservibles después de un proceso de demolición.

A pesar de que actualmente existe una gran variedad de sistemas y materiales constructivos, puede asumirse que la producción de vivienda a nivel nacional y local se sigue basando en el empleo del cemento y el acero, los cuales ocupan el mayor volumen de obra. Afirmaciones como las de K. Ghavammi (1995) en la que se dice que la industria de la construcción es una de las más contaminantes del planeta, se ven reforzadas por el hecho de que los materiales empleados en ella implican diversos niveles de deterioro ambiental en cada uno de los procesos de la economía de los materiales descrita por Leonard (2007), sumándose a esto el gasto y la dependencia de energías no renovables, principalmente el petróleo.

En este sentido, la Economía de los Materiales será abordada en este trabajo desde una perspectiva de sustentabilidad, en la que los materiales empleados en la producción de vivienda (y específicamente en el desarrollo del sistema de techumbre), puedan ser altamente reciclados o en su defecto, se reintegren al sistema por medio de su biodegradación, implicando además el menor gasto posible de recursos naturales, energéticos y económicos. (Imagen 1.20)

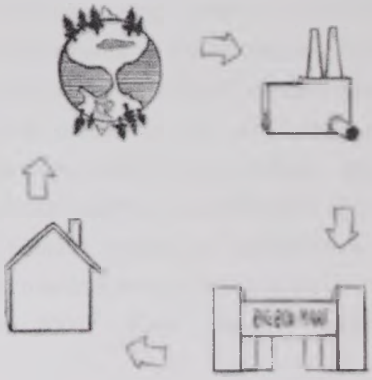


Imagen 1.20 Reintegración de los materiales después de su ciclo de vida

Fuente: "The Story of Stuff", documental de Annie Leonard (2007)

La escasez del petróleo

La contaminación, la extinción de especies, el calentamiento global por las emisiones de gas de efecto invernadero y los problemas de la salud son sólo algunos de los efectos antropogénicos que se han dejado sentir en las últimas décadas; estos efectos, a su vez, se han visto acelerados por la creciente población humana en el planeta, la cual demanda mayor cantidad de recursos, y genera una proporcional cantidad de desechos[12].

"El petróleo se va a agotar", ésta es una afirmación declarada por diversos investigadores en distintas disciplinas (Caso 1999, Leonard 2007 y Arzate 2010, por mencionar algunos). Esta afirmación tan grave pareciera no ser tomada en cuenta por el grueso de la sociedad debido a que sus repercusiones aún no le afectan de un modo perceptible, sin embargo, los efectos ocasionados por esta realidad serán múltiples y hasta cierto grado inminentes. En este sentido, han surgido una serie de debates en torno a cuándo ocurrirá el agotamiento de las reservas de petróleo, o en su defecto, el límite de su producción, así como las repercusiones que tendrá sobre la sociedad a nivel local y global.

En relación con esta polémica, King Hubbert, un geofísico norteamericano quien trabajó para la compañía de hidrocarburos "Shell", estableció una teoría llamada "Teoría del pico de Hubbert", también conocida como "cenit del petróleo" la cual predijo que la producción mundial de este hidrocarburo llegaría a su cenit o punto máximo, para posteriormente declinar en proporción semejante a su crecimiento. Los datos al respecto indicaban que en Estados Unidos de Norteamérica este cenit sería alcanzado en 1970, mientras que a nivel mundial la fecha se ubicaría alrededor del año 2000[13]. Estos cálculos fueron posteriormente

[12] McKibben, Bill, 1990, **El fin de la naturaleza**, Edit. Diana, México, 241pp.

[13] Chaize, Thomas, 2006, **King Hubbert: el pico de producción del petróleo**, Energy & Mining Newsletter, en [www.dani2989.com]

corroborados por la British Petroleum así como por el Departamento de Energía de los Estados Unidos.

De acuerdo con estos organismos, México alcanzó su cenit de producción de petróleo en el año 2004 (Imagen 1.21).

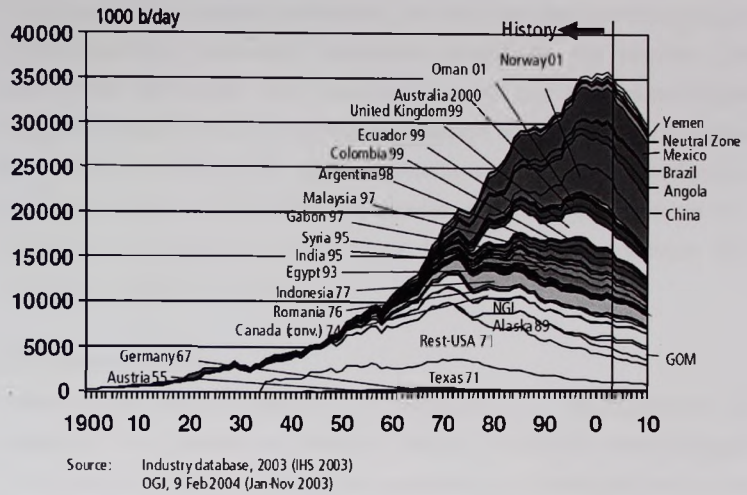


Imagen 1.21 Gráfica del pico de Hubbert señalando el cenit del petróleo en diversos países del mundo

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Hubbert_world_2004.png

Es importante considerar que las repercusiones de la escasez del petróleo dependerán en gran medida de la disminución de la producción, así como el nivel en que la sociedad se haya ido adaptando a modos alternativos de producción de energía; en este sentido se plantean escenarios diversos, tanto aquellos en los que existirá una escasez de todos los productos y servicios que dependan del petróleo, implicando esto una disminución generalizada en la calidad de vida y un colapso de la sociedad

industrializada, así como aquellos en los que las tecnologías y energías alternativas lograrán resolver el problema[14].

En el ramo de la construcción a nivel nacional e internacional, la repercusión de dicha escasez se hace evidente si tomamos en cuenta que la producción de muchos de los materiales empleados en dicha industria, (principalmente el cemento y el acero), así como los diversos procesos de transformación y transporte, dependen actualmente del petróleo. De presentarse una súbita crisis petrolera, ya sea por la escasez o por reformas energéticas que no dirijan su atención hacia el uso de energías renovables, la consecuencia lógica implicaría un incremento inmediato en los costos de los materiales industrializados, afectando directamente a la producción de vivienda, y más aún a los sectores de población con recursos económicos limitados.

El cemento y el acero

Considerando que el ramo de la construcción, y particularmente la producción de vivienda en México, emplea productos industrializados como principal material constructivo, se plantea una breve descripción del proceso de producción del cemento y del acero haciendo énfasis en las emisiones que generan, dado que son éstos dos de los materiales más empleados en el rubro (Imágenes 1.22, 1.23 y 1.24).

La producción del cemento requiere el uso de grandes hornos que elevan su temperatura hasta alcanzar de 1,400 a 2,000°C. Para alcanzar estas temperaturas necesitan una gran cantidad de energía, obtenida principalmente de los combustibles fósiles, como el petróleo.

El calentamiento de estos hornos produce emisiones contaminantes tales como partículas de polvo, y gases como dióxido de azufre, óxidos de

[14] http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_pico_de_Hubbert

nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono, además de cloruros, fluoruros, compuestos orgánicos tóxicos y metales pesados.[15]

Imagen 1.22 Cementera. Fuente: http://www.ecologiaverde.com

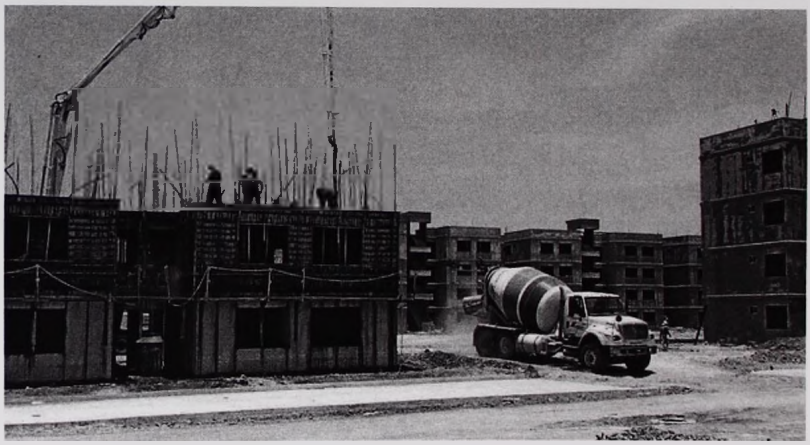


Imagen 1.23 Proyecto multi-residencial, Villahermosa, México

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cemex.JPG

[15] Artículos varios: **CEMENTO**, en [http://www.monografias.com/trabajos57/contaminacion-guanta-venezuela/contaminacion-guanta-venezuela2.shtml] / **Impactos ambientales, Cemento**, en [http://es.wikibooks.org/wiki/Impactos_ambientales/Cemento] / **El Cemento debe reducir su impacto ambiental**, en [http://www.ecologiaverde.com/el-cemento-debe-reducir-su-impacto-ambiental/]

Por su parte, en la fabricación del hierro y el acero, se producen grandes cantidades de aguas servidas y emisiones atmosféricas que degradan la tierra, el agua y el aire.[16]

"Por cada tonelada de bloque de acero fabricado se generan: 145kg de escoria, 230kg de escoria granulada, aproximadamente 150,000 litros de agua residual y alrededor de 2 toneladas de emisiones gaseosas (incluyendo CO2, óxidos sulfurosos y óxidos de nitrógeno)".[17]

Imagen 1.24 Alto Horno de fundición. Coahuila.
Fuente: http://img709.imageshack.us/f/26756mva.jpg

[16] Impactos ambientales. La fabricación de hierro y acero, en [http://es.wikibooks.org/wiki/Impactos_ambientales/Fabricaci%C3%B3n_de_hierro_y_acero]

[17] Lawson, Bill, 1996, **Building Materials Energy and the Environment**, Red Hill, Australia, Royal Australian Institute of Architects.

1.4 NUEVOS PARADIGMAS DE SUSTENTABILIDAD

Ante una realidad en la que las tecnologías constructivas (materiales y sistemas constructivos) empleadas con mayor frecuencia en el desarrollo de vivienda en nuestro país se basan en procesos industrializados contaminantes, los cuales a su vez dependen mayormente del uso de energías no renovables para su funcionamiento, se presentan distintas líneas de pensamiento y desarrollo científico y tecnológico que abren las puertas a una realidad diferente que tiende a la reducción en el uso de los recursos no renovables, a la sustentabilidad, a las tecnologías ancestrales y en general a una manera de ver la realidad desde una perspectiva holística y multidisciplinaria.

La Ecología Profunda

La Ecología Profunda fue un término acuñado en 1973 por el filósofo noruego Arne Dekke Eide Næss (1912-2009)[18] la cual se presenta como una rama reciente de la filosofía ecológica y conforma la transformación hacia un nuevo paradigma ideológico.

La Ecología Profunda se basa en los descubrimientos de la física cuántica y en experimentos a nivel subatómico que muestra una "*realidad constituida por redes de relaciones conformadas por la interdependencia de los fenómenos, en donde el énfasis está puesto en el conjunto de las relaciones más que en las partes*"[19].

Estos experimentos ponen en cuestión la visión del mundo basado en una "naturaleza objetiva", como un fundamento de la "ciencia moderna".

---

[18] http://es.wikipedia.org/wiki/Arne_N%C3%A6ss

[19] Paniagua-Sánchez, Deborah, 2008, **Sustentabilidad, habitabilidad y cultura**, Revista Cuadernos de arquitectura de Yucatán No. 20, pp.90-99.

"*La Ecología Profunda reconoce la interconexión de todos los fenómenos, y el hecho de que como individuos y sociedades estamos todos inmersos, y finalmente dependientes de los procesos cíclicos de la naturaleza*" (Capra, en Paniagua 2008).

Esto nos hace ver la necesidad de dejar de ver al universo como un sistema mecánico compuesto por "piezas", al cuerpo humano como una máquina, a la vida en sociedad como una lucha competitiva por la existencia, a la creencia en el progreso material ilimitado a través del crecimiento económico y tecnológico, por lo que las posturas holísticas y el desarrollo sustentable figuran como los nuevos modelos a seguir.

Desarrollo sustentable

De acuerdo al informe de Brundtland de 1987, se entiende por "Desarrollo Sustentable" a: "*Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades*"[20].

Por su parte, los términos "sustentable" o "sostenible" suelen estar relacionados también con el equilibrio entre especies (particularmente la especie humana) y los recursos que éstas necesitan para sobrevivir, de modo que los recursos no queden en riesgo de desaparecer. Este concepto pareciera implicar una acción intencional de explotación relacionado con la intencionalidad humana y no es algo que se dé en el ciclo natural de la vida, es decir, se trata de un fenómeno antropogénico.

A pesar de que el Desarrollo Sustentable puede dividirse conceptualmente en tres partes (ambiental, económica y social), abordaremos el tema desde la perspectiva de los recursos materiales y energéticos empleados

[20] ONU, 1987 **Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo** (Comisión Brundtland): Nuestro Futuro Común.

en la edificación, y particularmente en la edificación de vivienda, estableciendo una relación entre el medio ambiente y los materiales extraídos del mismo.

Arquitectura sustentable

En relación al Desarrollo Sustentable, surge el concepto de "Arquitectura Sustentable" en el cual la construcción del hábitat humano implica el menor impacto ambiental negativo en relación al consumo energético y a la explotación de los recursos naturales en su proceso de producción. En este sentido, los principios de la Arquitectura Sustentable a considerar serán:

- El contexto.- La consideración de las condiciones climáticas, la hidrografía y los ecosistemas del entorno en que se construyen los edificios, para obtener el máximo rendimiento con el menor impacto.

- Los materiales.- La eficacia y moderación en el uso de materiales de construcción, primando los de bajo contenido energético frente a los de alto contenido energético.

- Uso de la energía.- La reducción del consumo de energía para calefacción, refrigeración, iluminación y otros equipamientos, cubriendo el resto de la demanda con fuentes de energía renovables.

- Proceso de edificación.- La minimización del balance energético global de la edificación, abarcando las fases de diseño, construcción, utilización y final de su vida útil.

- Confort humano.- El cumplimiento de los requisitos de confort higrotérmico, salubridad, iluminación y habitabilidad de las edificaciones [21].

1.5 RECURSOS RENOVABLES Y RECURSOS DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL EN LA CONSTRUCCIÓN

La necesidad de un cambio de paradigma en favor del cuidado del medio ambiente en el que el hombre vive, implica la adopción de energías y recursos renovables o de bajo impacto ambiental que no pongan en riesgo el desarrollo de las futuras generaciones. Al mismo tiempo, el empleo de los recursos renovables plantea toda una serie de ventajas ecológicas y económicas que benefician al ser humano y al medio ambiente que lo rodea; menor consumo de energéticos, menor contaminación y mayor ahorro económico son tan solo algunas de ellas.

Así, se entenderá por recursos renovables aquellos "*recursos cuya existencia no se agota con su utilización, debido a que vuelven a su estado original o se regeneran a una tasa mayor a la tasa con que estos recursos son disminuidos mediante su utilización*"[22].

Por otro lado, entenderemos como "recursos de bajo impacto ambiental", a aquellos cuya utilización no implique un impacto ambiental negativo, ni fomenten la degradación del medio ambiente.

---

[21] Arquitectura Sustentable, en: http://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura_sustentable

[22] Definición acuñada por el autor, a partir de la definición de Recursos Renovables en [http://es.wikipedia.org/wiki/Recurso_natural].

Recursos renovables (vegetales)

Particularmente nos referiremos a los recursos vegetales renovables (específicamente el bambú), cuya capacidad de regeneración vaya a la par de su explotación (o incluso la exceda), de modo que puedan llegar a representar uno de los principales recursos materiales a emplearse en la construcción en relación con su bajo costo de producción, y los aportes que pueda ofrecer al medio ambiente.

1.6 EL BAMBÚ

Dentro de toda una gran gama de recursos renovables a emplear, particularmente en la construcción, el bambú ofrece grandes ventajas.

Su rápido crecimiento, adaptabilidad a diversos climas y topografías, bajos costos de producción, multiplicidad de usos, así como sus cualidades mecánicas, son algunas de las características que hacen factible y sustentable su uso en la construcción, sin mencionar que además ofrece, por volumen de producción, una mayor absorción de dióxido de carbono que un árbol, y protege a los suelos de la erosión, preservando así el medio ambiente.

Descripción

En ocasiones suele considerarse una especie de madera; en realidad, el bambú es una planta gramínea como el arroz, el maíz o la caña de azúcar, sin embargo, a diferencia de éstos y al paso de algunos años, la lignina en sus tejidos lo convierte en una estructura dura como la madera, pero más flexible y liviana (Minke, 2010). Los tallos de bambú crecen directamente desde un tallo subterráneo llamado "rizoma". Los rizomas, por su modo de crecimiento, pueden ser paquimorfos ó leptomorfos (Imagen 1.25), siendo

el primer caso un crecimiento en todas direcciones, y el segundo un crecimiento de manera lineal[23].

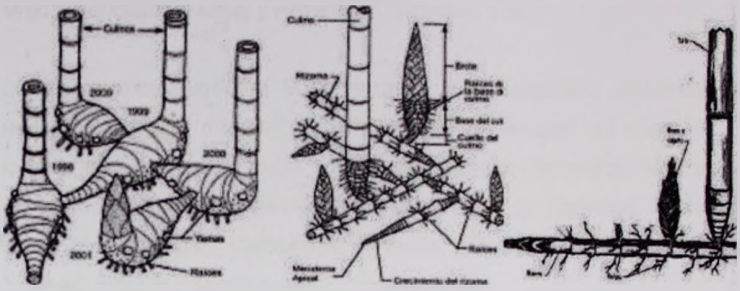


Imagen 1.25 Rizomas paquimorfos y leptomorfos

Fuente http://red.fau.ucv.ve:8080/static/dtii/images/rizomas.jpg

Antecedentes

Si bien el uso del bambú es muy variado, su empleo en la construcción se ha dado desde tiempos inmemoriales en varios países alrededor el mundo, principalmente en China y en el sur de Asia; así mismo, se han registrado restos de construcciones de bambú que datan de entre 5550 A.C y 3500 A.C, en la civilización de Valdivia, en Ecuador[24]. Por su parte, Gernot Minke (2010) señala que "*desde la antigüedad, el bambú ha sido un material de construcción aplicado desde hábitats primigenios hasta edificaciones complejas, y ha formado parte del conjunto de elementos que fueron eje del desarrollo cultural en Asia y América*".

[23] Minke, Gernot, 2010, **Manual de construcción con bambú**, Alfonso Moreno (ed.), Cali, Colombia, 155pp.

[24] Kries, Mateo, 2000, **Grow your own house – Simón Vélez and bamboo architecture**, Vitra Design Museum, Alemania.

Distribución

Los bambúes se encuentran en forma silvestre en Asia, África, Australia y América, en áreas tropicales, subtropicales y en algunas zonas templadas como es el caso de Chile y Argentina[25] (Imagen 1.26).

Existen aproximadamente 90 géneros y 1200 especies diferentes de bambú en todo el mundo[26]. En México se encuentran 42 especies de bambú, sin embargo no todas son aptas para la construcción. Algunos de los estados donde principalmente se encuentran las especies aptas son: Veracruz, Chiapas, Campeche, Puebla, Oaxaca, Jalisco, Sinaloa, Durango, Nayarit y Michoacán[27] (Imagen 1.27).

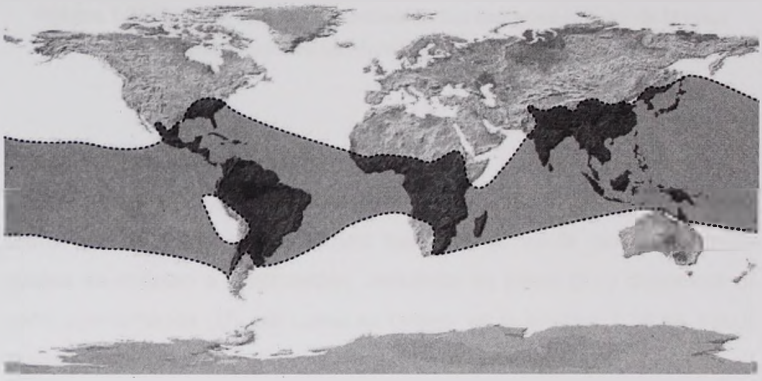


Imagen 1.26 Distribución geográfica del bambú en el mundo

Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bambusoideae_World_map.png

[25] **El bambú en el mundo**, artículo, [http://www.bambu.cl/bambu_mundo.htm]

[26] Magno de Castro, Roberto, 2005, **O bambú no Brasil e no Mundo**, Brasil, 45pp.

[27] Bejarano López, Rafael, 2002, **Metodología para la construcción de vivienda utilizando como material principal el bambú**, Veracruz, México.

Imagen 1.27 Mapa de distribución natural de los bambúes nativos de México

Fuente: http://www.bambumex.org/paginas/MAPA.pdf

El bambú para construcción

Gernot Minke (2010) en su libro "Manual de Construcción con Bambú", menciona las especies de bambú más usadas en la construcción las cuales se enlistan a continuación, indicando su altura (h) y diámetros de caña aproximados (Ø), así como su origen; en la imagen 1.28 se puede observar el aspecto de diferentes especies de bambú.

Bambusa:

- *Bambusca balcoa*: h 12-20m, Ø8-15cm, Origen: India.
- *Bambusa disimulator*: h 12m, Ø6cm, Origen: China del sur.
- *Bambusa edilis*: h 20m, Ø15cm, Origen: China.
- *Bambusa polymorpha*: h 20m, Ø15cm, Origen: China, Bengala, Burma.
- *Bambusa stenostachya*: h 22m, Ø15cm, Origen: China.
- *Bambusa vulgaris*: h 18m, Ø10cm, Origen: Asia, América.
- *Bambusa bambosa*: h 30m, Ø15-18cm, Origen: Sureste de Asia.

Bambusa nepalensis: h 20m, Ø10cm, Origen: No especificado.

Bambusa oldhami Munro: h 6-12m, Ø3-12cm, Origen: Taiwán.

Bambusa vulgaris, Schrader ex Wendland: h 6-15m, Ø5-10cm, Origen: Sur de China.

Chusquea:

Chusquea culeou: h 6m, Ø4cm, Origen: Chile.

Chusquea culeou Desvaux: h 4-6m, Ø2-4cm, Origen: Centro y Sudamérica.

Dendrocalamus:

Dendrocalamus balcoa: h 20m, Ø20cm, Origen: Sudeste asiático e India.

Dendrocalamus giganteus: h 30m, Ø+30cm, Origen: India, Burma, Sri Lanka, Tailandia.

Dendrocalamus asper: h 25m, Ø20cm, Origen: No especificado.

Dendrocalamus latiflorus: h 20m, Ø20cm, Origen: Taiwán, China del sur.

Gigantochloa:

Gigantochloa apus: h 16m, Ø10cm, Origen: Malaysia, Indonesia.

Gigantochloa ultraviolacea: h 13m, Ø8cm, Origen: Malaysia, Indonesia.

Gigantochloa levis: h 16m, Ø10-15cm, Origen: Filipinas.

Guadua:

Guadua angustifolia Kunth: h 18-24m, Ø9-12/18cm, Origen: Sudamérica.

Guadua aculeata: h 25m, Ø12cm, Origen: Desde México hasta Panamá.

Guadua chacoensis: h 20m, Ø8-12cm, Origen: Norte de Argentina, trópico boliviano.

Guadua paniculata Munro: h 10m, Ø3cm, Origen: Trópico boliviano.

Guadua superba Huber: h 20m, Ø9-12cm, Origen: Trópico boliviano.

Phyllostachys:

Phyllostachys aurea: h 5m, Ø2cm, Origen: China y Japón.

Phyllostachys bambusoides: h 22m, Ø14cm, Origen: Japón.

Phyllostachys nigra, var. henonis: h 16m, Ø9cm, Origen: China.

Phyllostachys pubescens: h 21m, Ø17cm, Origen: China.

Phyllostachys vivax: h 21m, Ø12cm, Origen: China.

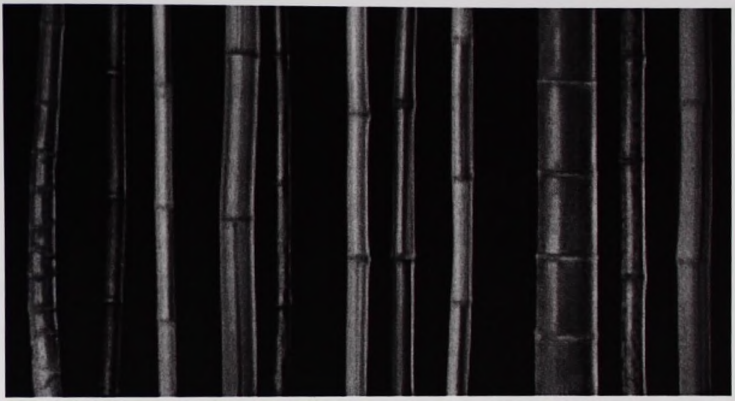


Imagen 1.28 Aspecto de diversas especies de bambú.

Fuente: http://www.conbam.info/pix/Bambuse.jpg

Beneficios medioambientales

Minke (2010) menciona los siguientes efectos positivos al medio ambiente como resultado de la producción de bambú:

- Producción de biomasa: la biomasa es la materia orgánica utilizable como fuente de energía; en este sentido, el bambú es un recurso natural cuyo

rápido crecimiento produce una gran cantidad de biomasa seca por hectárea y por año. En el sur de la India por ejemplo, la biomasa seca del bambú *bambusa bambos* alcanza las 47 toneladas por hectárea por año (Liese y Dünking,2009 en Minke, 2010), mientras que en el Valle de Cauca, Colombia, esta cantidad asciende a 100 toneladas por hectárea en un periodo de 6 años en el cultivo de la especie *Guadua angustifolia* (Riaño, 2002, en Minke, 2010).

- Reducción de la erosión del suelo, debido a su densa red de raíces que sujetan la tierra.

- Retención de agua: Una hectárea de bosque de *Guadua angustifolia* puede retener más de 30,000 litros de agua (Sabogal, 1979, en Minke, 2010).

- Regulación del caudal hídrico: Debido a la retención del agua en sus culmos (tallos), el bambú almacena agua en la época de lluvias, la cual utiliza en la época de sequía.

- Reducción de temperatura: Los bosques de bambú reducen la temperatura del aire por el efecto de la evaporación del agua gracias a sus hojas.

- Fijación de CO_2: Por la rapidez en su crecimiento, el bambú capta más CO_2 que un árbol. La *Guadua Angustifolia Kunth* capta en sus primeros seis años de crecimiento 54 toneladas de CO_2 por hectárea (Londoño 2003, en Minke 2010).

- Energía primaria: La energía que se usa para la producción de bambú es de 300 MJ/m^3, comparada con 600 MJ/m^3 de la madera (Janssen, 1981 en Minke, 2010).

En relación a su uso como material de construcción, Kries (2000) menciona que el procesamiento del bambú virtualmente no produce desperdicios ya que su corteza no tiene que ser removida y sus hojas pueden ser empleadas como forraje; menciona también que en muchos casos el transporte (y su consecuente daño ambiental) es innecesario ya que el bambú crece casi en cualquier parte, e incluso, las construcciones (edificios) de bambú pueden ser fácilmente reciclados o desmantelados, además de que es fácil reemplazar componentes individuales.

Propiedades mecánicas

Entre las principales razones por las que el bambú ha sido considerado como un material de construcción, se encuentran sus propiedades mecánicas, principalmente compresión, tensión y flexión, así como el módulo de elasticidad, cuyos valores varían según la especie. Por citar algunos ejemplos, se enlistan a continuación las propiedades mecánicas promedio de algunas especies de bambú, probadas por Oscar Hidalgo (2003), y mencionadas en Minke (2010) (Imagen 1.29).

Dendrocalamus giganteous:

Módulo de elasticidad: 143,206 Kg/cm^2

Módulo de ruptura: 1,823 Kg/cm^2

Resistencia a la compresión: 627 Kg/cm^2

Resistencia a la tensión: 1,907 Kg/cm^2

Dendrocalamus asper:

Módulo de elasticidad: 131,292 Kg/cm^2

Módulo de ruptura: 1,638 Kg/cm^2

Resistencia a la compresión: 605 Kg/cm^2

Resistencia a la tensión: 2,127 Kg/cm^2

Gigantochloa robusta:

Módulo de elasticidad: 98,293 Kg/cm^2

Módulo de ruptura: 1,355 Kg/cm^2

Resistencia a la compresión: 521 Kg/cm^2

Resistencia a la tensión: 1,914 Kg/cm^2

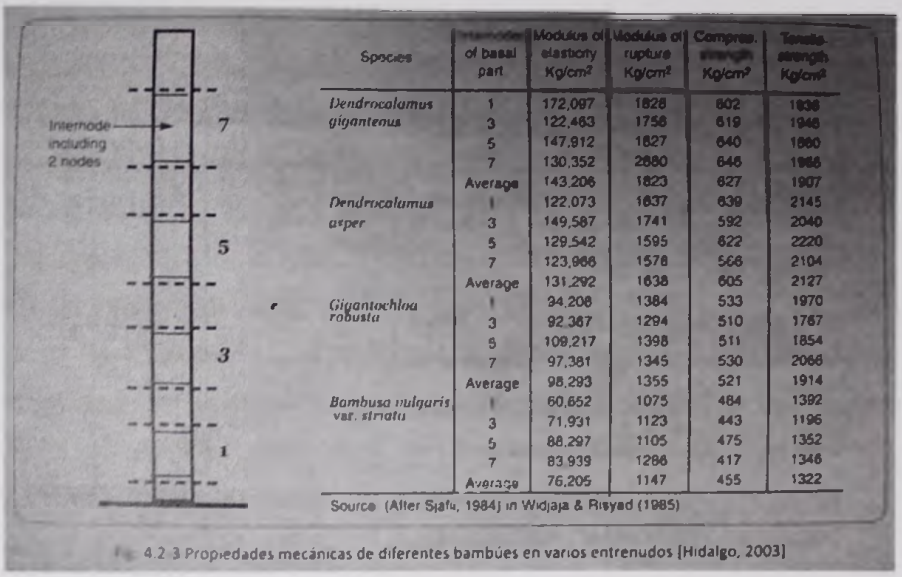
Bambusa vulgaris var. *striata*:

Módulo de elasticidad: 76,205 Kg/cm^2

Módulo de ruptura: 1,147 Kg/cm^2

Resistencia a la compresión: 455 Kg/cm^2

Resistencia a la tensión: 1,322 Kg/cm^2



Species	Internode of basal part	Modulus of elasticity Kg/cm²	Modulus of rupture Kg/cm²	Compres. strength Kg/cm²	Tensile strength Kg/cm²
Dendrocalamus giganteus	1	172,097	1828	602	1838
	3	122,463	1756	619	1948
	5	147,912	1827	640	1860
	7	130,352	2880	646	1966
	Average	143,206	1823	627	1907
Dendrocalamus asper	1	122,073	1637	639	2145
	3	149,587	1741	592	2040
	5	129,542	1595	622	2220
	7	123,966	1578	568	2104
	Average	131,292	1638	605	2127
Gigantochloa robusta	1	94,208	1384	533	1970
	3	92,367	1294	510	1767
	5	109,217	1398	511	1854
	7	97,381	1345	530	2066
	Average	98,293	1355	521	1914
Bambusa vulgaris var. *striata*	1	60,652	1075	484	1392
	3	71,931	1123	443	1196
	5	88,297	1105	475	1352
	7	83,939	1286	417	1346
	Average	76,205	1147	455	1322

Source (After Sjafu, 1984) in Widjaja & Risyad (1985)

Fig. 4.2-3 Propiedades mecánicas de diferentes bambúes en varios entrenudos [Hidalgo, 2003]

Imagen 1.29 Propiedades mecánicas de diferentes bambúes en varios entrenudos

Fuente: Hidalgo (2003) en Minke (2010).

En cuanto al módulo de elasticidad en particular, González (2007)[28] indica los siguientes valores promedio para la *guadua angustifolia* Kunth, según su edad de maduración:

[28] González Héctor, 2007, **Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie *guadua angustifolia* Kunth**, Revista Scientia et Technica, no.35, Agosto de 2007, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Verde: 11,631.028 N/mm^2 (118,636 Kg/cm^2)
Madura: 12,476.938 N/mm^2 (127,264 Kg/cm^2)
Sobremadura: 13,996.870 N/mm^2 (142,768 Kg/cm^2)

Por su parte, Minke (2010) indica los siguientes valores para la misma especie:

Modulo de elasticidad (compresión) = 1,840 kN/cm^2 (187,627 Kg/cm^2)
Módulo de elasticidad (flexión) = 1,790 kN/cm^2 (182,529 Kg/cm^2)
Módulo de elasticidad (tracción) = 2,070 kN/cm^2 (211,081 Kg/cm^2)

Finalmente, Barbaro (1997)[29] indica un valor de 200,000 Kg/cm^2 para el bambú como material genérico.

Durabilidad

La durabilidad del bambú en la construcción depende principalmente de su edad de cosecha, del tratamiento que recibe para su protección contra insectos y del aislamiento contra materia orgánica, exceso de humedad o tierra en su disposición final en una construcción. En este sentido, diversas fuentes arrojan datos similares al respecto:

Fuente No.1[30]

- Durabilidad con tratamiento (a la intemperie): 6 años promedio, sin estar expuesto a materia orgánica y con buen drenaje.
- Durabilidad con tratamiento (con protección de intemperie): Toda la vida de la estructura fabricada.

[29] Barbaro, Giovanna, 1997, **Transformación e industrialización del bambú**, segunda parte de la tesis publicada en Venecia: "La biónica del bambú", Barcelona, España

[30] Datos otorgados por el Sr. Jeremy Faulk, en relación al bambú de la especie *dendrocalamus strictus* cultivada en la hacienda Xixim.

- Durabilidad con tratamiento (a la intemperie marina): 15 años comprobados en un proyecto construido en 1996.

Fuente No.2[31]

- Durabilidad "natural": de 18 a 30 meses. (1.5 a 2.5 años).
- Durabilidad sin tratamiento: de 2 a 5 años.
- Durabilidad sin tratamiento (a modo de postes): de 1 a 2 años, por las termitas y los hongos.
- Durabilidad con tratamiento de "tanque abierto": de 10 a 15 años.
- Durabilidad con tratamiento de "presión": de 10 a 20 años.

Fuente No.3[32]

- Durabilidad sin tratamiento expuesto a la intemperie: de 1 a 3 años
- Durabilidad sin tratamiento bajo cubierta: de 4 a 7 años (o más).
- Durabilidad bajo circunstancias favorables (como vigas o marcos): de 10 a 50 años.
- Durabilidad en agua de mar: menos de un año debido a los microorganismos marinos.

El bambú en Yucatán

En Yucatán, a pesar de que no es considerado dentro de los estados productores de bambú, se pueden encontrar algunas especies tales como la "*dendrocalamus strictus*" y la "*dendrocalamus asper*". El primero, también conocido como "*Iron Bamboo*" se cultiva a gran escala en la Hacienda Xixim (perteneciente al Municipio de Muna), para la producción de muebles, cercas y pequeñas estructuras (Imagen 1.30).

[31] INBAR (International Network of Bamboo and Rattan).

[32] Guilles Lessard y Amy Chouinard, 1980, **Bamboo research in Asia, procedings of a workshop held in Singapore 28-30 May 1980**, Otawa, Ont. Canada. 228pp. (revisión pp.165 – 172)

Imagen 1.30 *Dendrocalamus strictus* en la Hacienda Xixim, Yucatán

Fotografía: Luis Llovera

El segundo, conocido también como "Bambú gigante" se cultiva para su venta como planta individual (Imagen 1.31); aparte, pueden encontrarse algunas otras especies en viveros locales, sin embargo su cultivo no se realiza con el objetivo de obtener material para construcción.

Ambas especies ofrecen cualidades constructivas tanto por sus dimensiones y cualidades físicas, como por su disponibilidad y uso relacionado con la construcción.

Imagen 1.31 "Bambú Gigante" en la Quinta del bambú, Mérida Yuc.
Fotografía: Carlos Uribe

1.7 BIOCONSTRUCCIÓN

La palabra "bioconstrucción" es una interpretación del término alemán "bau-biologie" (bau = construcción + biologie = biología), acuñada en Neubern, Alemania por el profesor alemán Anton Schneider, fundador del *institut für baubiologie* (Instituto de baubiología) en 1976, y posteriormente del *Institut für Baubiologie + Oekologie Neubeuern* (Instituto de baubiología y ecología de Neubern) ó "IBN" en 1983.[33]

La baubiología estudia las relaciones del ser humano con su entorno edificado, a través de la construcción del hábitat humano con técnicas que garanticen ahorros energéticos y una mejora en la salud ambiental y de

[33] http://www.baubiologie.es

los usuarios[34]; así mismo puede mencionarse que su desarrollo implica el uso de materiales de bajo impacto ambiental, reciclados o altamente reciclables, o extraídos mediante procesos simples y de bajo costo como por ejemplo materiales de origen vegetal[35].

La historia de la baubiología o "bioconstrucción" se remonta a la a la Alemania de la postguerra cuando la premura por regenerar las ciudades propició la aparición de construcciones hechas de manera rápida y económica, las cuales tuvieron repercusiones en la salud de la gente, debido al empleo de ciertos materiales y métodos de construcción inadecuados. Ante esto, surgió la necesidad de desarrollar construcciones de manera "sana"[36], lo cual explica el enfoque de la bioconstrucción en el empleo de materiales y procesos sanos para el hombre y para el medio ambiente.

El IBN estableció 25 principios como fundamentos de la *baubiologie*. Dichos principios, elaborados en 1980 y actualizados en 2005, se distribuyen en cinco principales rubros, enumerados a continuación:[37]

Materiales de construcción e insonorización (4 principios):

- Materiales naturales y no adulterados.
- Materiales inodoros o de olor agradable que no emitan sustancias tóxicas.
- Materiales de baja radioactividad.
- Protección acústica y anti vibratoria orientada a las personas.

Clima interior (9 principios):

- Regulación natural de la humedad atmosférica interior mediante el uso de materiales higroscópicos.

[34] http://www.terra.org/html/s/rehabilitar/bioconstruccion
[35] http://es.wikipedia.org/wiki/Bioconstrucci%C3%B3n
[36] http://www.homesthatheal.com/bau_biologie.html
[37] http://www.baubiologie.de/site/es/fundamentos.php

- Minimización y disipación rápida de la humedad de la obra nueva.
- Proporción equilibrada de aislamiento térmico y acumulación de calor.
- Temperaturas óptimas de las superficies y del aire ambiente.
- Buena calidad del aire ambiente gracias a una renovación natural.
- Calor radiante para la calefacción.
- Alteración mínima del entorno de radiación natural.
- Ausencia de campos electromagnéticos y ondas de radio en expansión.
- Reducción de la presencia de hongos, bacterias, polvo y alérgenos.

Medio ambiente, energía y agua (4pincipios):

- Minimización del consumo de energía aprovechando al máximo fuentes de energía renovables.
- Materiales de construcción procedentes, preferiblemente, de la región y que no favorezcan la explotación abusiva de materias primas escasas o peligrosas.
- Prevención de problemas para el medio ambiente.
- Calidad óptima posible del agua potable.

Interiorismo (3 principios):

- Respeto de dimensiones, proporciones y formas armoniosas.
- Condiciones naturales de luz, alumbrado y colorido.
- Aprovechamiento de los conocimientos de fisiología y ergonomía en la decoración y el equipamiento del espacio interior.

Obra (5 principios):

- Ausencia de perturbaciones naturales y artificiales en la obra.
- Viviendas alejadas de fuentes de emisiones contaminantes y ruidos.
- Método de construcción descentralizado y flexible en urbanizaciones ajardinadas.
- Vivienda y entornos residenciales individuales, muy relacionados con la naturaleza, dignos y compatibles con la vida familiar.

- Ausencia de secuelas sociales negativas.

Si bien estos principios abarcan diversos y muy variados aspectos de la construcción, el desarrollo de este trabajo se enfocará en aquellos relacionados principalmente con los materiales, el confort térmico y el consumo de energía, resumidos a continuación:

1. Materiales naturales y no adulterados.
2. Materiales inodoros o de olor agradable que no emitan sustancias tóxicas.
3. Materiales de baja radioactividad.
4. Proporción equilibrada de aislamiento térmico y acumulación de calor.
5. Temperaturas óptimas de las superficies y del aire ambiente.
6. Buena calidad del aire ambiente gracias a una renovación natural.
7. Minimización del consumo de energía aprovechando al máximo fuentes de energía renovables.
8. Materiales de construcción procedentes, preferiblemente, de la región y que no favorezcan la explotación abusiva de materias primas escasas o peligrosas.

A su vez, esta selección dará paso a la formulación de ciertas generalidades de la bioconstrucción desde su aspecto constructivo, de modo que para fines de este trabajo ésta será entendida como "aquel tipo de construcción cuyo desarrollo implique el uso de materiales de bajo impacto ambiental en cualquier momento de su ciclo vital identificado en la economía de los materiales (extracción, producción, distribución, uso y descarte), que no supongan la explotación de recursos limitados o en peligro, permitiendo la convergencia de tecnologías acronotópicas (de distinto tiempo y lugar) basándose en las tradiciones constructivas a través del intercambio de experiencias y empleo eficiente de los recursos naturales locales, implicando una alternativa a los procesos y materiales constructivos industrializados o capitalizados generalmente

contaminantes, figurando la autoconstrucción como uno de los modos de llevarla a cabo".

"...*la bioconstrucción, se convierte en una directriz intelectual que permite dar un viraje al enfoque actual dado al tema de la arquitectura y así podremos dar soluciones más apropiadas, más armónicas y sostenibles al futuro de las nuevas generaciones*"[38].

En este sentido, la bioconstrucción podrá ser entendida también como el medio a través del cual una construcción o edificación pueda ser comparada con un organismo que nace, y tras concluir su vida útil, muere y se descompone, reintegrándose al medio ambiente del que provino.

Finalmente, la bioconstrucción se distinguirá de conceptos tales como "arquitectura bioclimática" o "construcción sostenible" dado que implica la convergencia de ambas.

1.8 TECNOLOGÍA

Desde su existencia, el ser humano se ha visto en la necesidad de adaptarse al medio en el que vive; en este proceso observó la utilidad de fabricar artefactos que facilitaran la satisfacción de sus necesidades básicas tales como alimentación, vivienda y protección contra fenómenos naturales y animales peligrosos; esta fabricación de aparatos o artefactos fue posteriormente complementada con el dominio del fuego, lo cual representaban ya un conjunto de "tecnologías", término empleado para

[38] Osorno B. Claudia Yolanda, "hacia la bioconstrucción" (2001), en Claudia Osorno, Carmen Durán y otros (eds.), **Bioética como puente entre ciencia y sociedad**, Bogotá, Colombia. Pp. 19-36

definir a los "*conocimientos que permiten fabricar objetos y modificar el medio ambiente, con el objetivo de satisfacer las necesidades humanas*"[39].

Al día de hoy, la Tecnología no solo ha buscado satisfacer las necesidades básicas, sino que también se ha enfocado en otras "necesidades" tales como la satisfacción de placeres y deseos, los cuales han degenerado en hedonismo, necesidad de status y poder[40]. Si bien la Tecnología ha sido asociada al progreso social y económico, ha sido también asociada al deterioro de nuestro entorno, por lo que se hace necesario enfocarla hacia la protección del medio ambiente, de modo que la satisfacción de nuestras necesidades no implique el agotamiento o degradación de los recursos naturales y energéticos del planeta[41].

Entendiendo entonces la Tecnología desde una perspectiva práctica, como un medio a través del cual las personas satisfacen sus necesidades básicas empleando técnicas y artefactos, se asociará a ella la necesidad de establecer un proceso que abarque desde la identificación de un problema práctico a resolver, hasta la concreción de la idea que ofrecería una solución a dicho problema, pasando a través de un establecimiento de requisitos que deba cumplir la solución, un principio de funcionamiento, un diseño del artefacto y finalmente la construcción de un prototipo[42] (Imagen 1.32).

---

[39] **Tecnología** en: http://definicion.de/tecnologia/

[40] **Tecnología**, en: http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa

[41] Ídem.

[42] **Tecnología**, en: http://definicion.de/tecnologia/

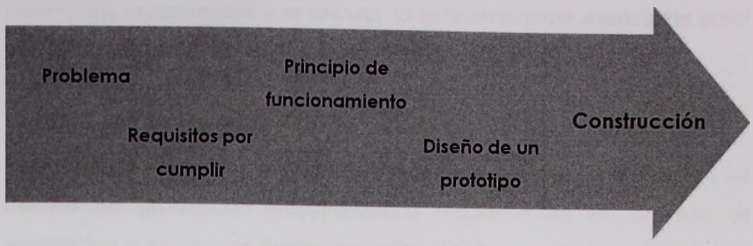


Imagen 1.32 Concepto de tecnología
Dibujo: Carlos Uribe

En relación al desarrollo de vivienda según Gálligo (2005), las tecnologías deben cumplir en un principio, con las cualidades de "apropiada" y "apropiable", es decir:

- Que respondan a las condiciones y capacidades culturales, técnicas o socioeconómicas de cada lugar.
- Que no generen dependencia económica o tecnológica.
- Que sean aceptadas por la población.
- Que contribuyan con un desarrollo sustentable.

Tecnologías apropiadas

Ante la necesidad de evitar los impactos negativos sobre el medio ambiente y sobre otras personas como resultado del uso de la tecnología en relación al desarrollo del hábitat humano, la Tecnología Apropiada se referirá entonces, no solamente a evitar impactos negativos, sino incluso a propiciar impactos benéficos para el medio ambiente y las personas en general.

Partiendo de las experiencias de Carlos González Lobo en relación con la producción de vivienda para personas de escasos recursos, se adoptará el concepto de tecnología apropiada como "*el uso eficiente y científico de los*

materiales, la geometría y el cálculo, lo suficientemente avanzados como para que sean viables frente a la escasez de recursos"[43].

Tecnologías intermedias

Dado que, la aplicación de Tecnologías apropiadas independientes de los medios de producción industrializados requieren de un proceso de asimilación o incluso de fusión con estas tecnologías industrializadas, las Tecnologías Intermedias se presentan como aquellas "*aptas para integrar trabajo artesanal y materiales regionales junto a métodos de prefabricación en sitio, producción, sistematización y optimización de los recursos materiales*"[44], es decir, tecnologías que comparten características de las apropiadas y de las industriales[45].

Tecnologías apropiables

Finalmente, la Tecnología Apropiable se referirá a aquella tecnología que "*debe ser captada y practicada por el usuario sin formación específica (...), debe, por lo tanto, estimular su comprensión y creatividad*"[46].

En este sentido, se buscaría que dicha tecnología cumpla con características tales como: que se la pudiera usar mediante un rápido aprendizaje, sencillo y con pocas metas, que no exija ni el manejo ni la posesión de equipo de construcción sofisticado, que permita e induzca a la colaboración en el trabajo ya que esto aglutina, solidariza y fortalece a la organización autogestiva, que se adapte a los ritmos y tiempos de cada circunstancia o disposición del grupo para construir mediante faenas, que integre a todos como mano de obra, tanto a los ancianos, como a los niños, las señoras, los jóvenes, etc.[47].

---

[43] González Lobo (1998).
[44] *Ídem.*
[45] **Tecnologías apropiadas**, [http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADa#Tecnolog.C3.ADas_apropiadas]
[46] González Lobo (1998).
[47] *Ídem.*

Aspectos tecnológicos de la autoconstrucción

En relación a la tecnología en la autoconstrucción, Julián Salas menciona que "*el marco tecnológico abarca materiales, equipos, herramientas, mano de obra, así como conceptos constructivos y estructurales; interrelacionados éstos para construir un sistema integral que, junto con el proceso, constituyen una manera de hacer la autoconstrucción*"[48]. Así, identifica cuatro niveles tecnológicos diferenciados, resumidos a continuación:

a. **Tecnología precaria:**
   - Utilización de desechos naturales o producidos.
   - Ensamblado aleatorio (heterodoxia constructiva).
   - No utiliza herramientas ni equipos específicos.
   - Cubierta y muros sólo como aislamiento visual del exterior.
   - Mano de obra sin preparación.

b. **Tecnología artesanal:**
   - Uso de elementos neutros con cierto nivel de procesamiento: adobes, bloques, placas, postes, viguetas, etc.
   - Muros sólidos, techos a base de láminas (calamina, asbesto, zinc).
   - Mezcla de soluciones para un mismo material y entre materiales diferentes.
   - Carece de proceso constructivo previamente definido.
   - El sistema constructivo sólo permite el crecimiento horizontal.
   - Empleo de herramientas básicas y convencionales.
   - Desperdicio de materiales por sobredimensionamiento y carencias en otros casos.
   - Asesoramiento / participación reducida de obreros especializados.

[48] Salas, (1992).

c. **Tecnología de industrialización incipiente:**

- Materiales convencionales y de industrialización incipientes o prefabricados in situ de fácil ensamble.
- "Sistemas" elementales para autoconstrucción, con definición de procesos de: vertido, corte y ensamble; albañilería; montaje, etc.
- Uso eficiente y calculado del material.
- Manejo manual de componentes.
- Mano de obra con algún conocimiento precio y capacitación.
- Utilización mínima de equipo / herramientas específicas.
- Previsión de crecimiento vertical.
- Cumplimiento (flexible) del marco normativo.

d. **Tecnología de industrialización asimilable:**

- Uso de elementos prefabricados con reglas de unión preestablecidos.
- Herramientas y equipo específico, incluso semipesado.
- Mano de obra especializada, nivel de capataces.
- Uso eficaz y eficiente del material y del sistema, siguiendo un método de cálculo / uso.
- Normalización de elementos fundamentales.
- El producto formal es una de las soluciones posibles de una gama.
- Optimización de mano de obra y de materiales.

Podemos ver así que, si bien el desarrollo de vivienda pudiera llegar a considerar el uso de tecnologías apropiadas, apropiables, o bien intermedias, no deberá dejarse de considerar que dicho desarrollo, en la vivienda autogestionada está estrechamente relacionado con la autoconstrucción, la cual puede darse en diferentes etapas, relacionadas éstas con los conocimientos y preparación técnica, con los recursos económicos así como con la disponibilidad de los materiales.

1.9 SEGURIDAD

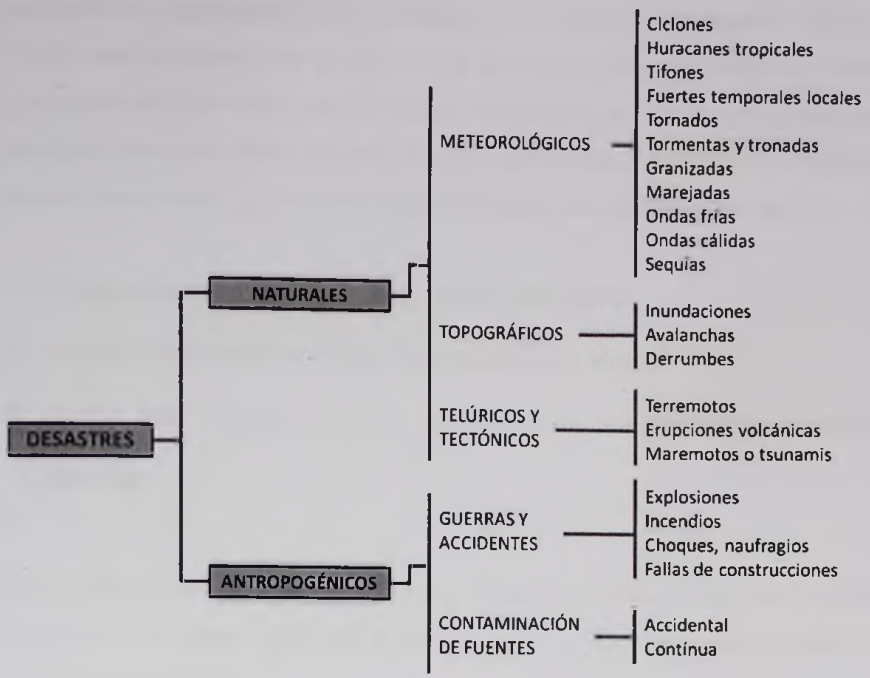
El concepto de seguridad, referido a la vivienda, y particularmente a la techumbre, será relacionado con la protección que éstas (vivienda o techumbre) puedan ofrecer a sus habitantes ante los fenómenos naturales característicos de nuestra región, entendiendo a los "fenómenos naturales" como aquellos "cambios en la naturaleza que suceden por sí solos"[49], o como aquellos "procesos permanentes de movimientos y de transformaciones que sufre la naturaleza"[50], considerando que en ellos no influyen efectos antropogénicos.

Puede asumirse que cualquier cubierta ejerce cierto nivel de protección contra los fenómenos meteorológicos así como del sol, sin embargo, cuando dichos fenómenos superan su límite de "normalidad", la seguridad se verá relacionada entonces con la protección que la vivienda o la techumbre puedan ofrecer a sus habitantes ante dichos fenómenos anormales o "desastres naturales"[51], así como su resistencia a un eventual colapso.

La Universidad Estatal a Distancia de Costarica (UNED), clasifica los desastres naturales según su origen, como indica la siguiente gráfica:[52]

---

[49] **Fenómenos naturales**, [http://es.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%B3meno_natural]
[50] *Ídem.*
[51] **Desastres naturales**, [http://es.wikipedia.org/wiki/Desastre_natural]
[52] Universidad Estatal a Distancia (UNED), 1983-1984, **La remoción en masa e inundaciones: dos fenómenos topográficos muy comunes**, San José, Costarica, en [http://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/pdf/spa/doc1788/doc1788-contenido.pdf]



Gráfica 1.1 Clasificación de desastres según su origen.

Dibujo: Carlos Uribe

Fuente: http://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/pdf/spa/doc1788/doc1788-contenido.pdf

Dadas las condiciones geográficas de nuestro estado, en esta investigación nos referiremos solamente a los desastres naturales meteorológicos, y específicamente a los efectos y daños ocasionados ya sea directa o indirectamente por ciclones y huracanes.

En cuando a la seguridad en general, nos referiremos a la seguridad mecánica ante desastres naturales y eventuales casos de cargas generadas en el uso habitual.

En relación con lo anterior, el actual Reglamento de Construcciones del Municipio de Mérida, en su artículo 297 indica los valores mínimos

aceptables de cargas vivas unitarias para diseño estructural[53] (Imagen 1.33), considerando las cargas vivas admisibles en cubiertas y azoteas con pendiente no mayor del 5% (cubiertas planas) así como en cubiertas y azoteas con pendiente mayor del 5% (cubiertas inclinadas) señalando, según sea el caso, el tipo de carga a emplear, siendo las opciones:

1. Carga viva máxima (W_m), para diseño estructural
2. Carga viva instantánea (W_a), para diseño por viento
3. Carga viva media (W), para el cálculo de asentamientos y flechas diferidas).

Considerando lo anterior, los datos a emplear en este trabajo se referirán a las cargas vivas unitarias para cubiertas y azoteas, considerando la carga viva máxima.

[53] Ayuntamiento de Mérida, 2004 , **Reglamento de Construcciones del municipio de Mérida**, [http://www.yucatan.gob.mx/gobierno/orden_juridico/Yucatan/Reglamentos/nr473rf1.pdf]

CARGAS VIVAS UNITARIAS, en Kg/m² (kN/m²)				
Destino de piso o cubierta	W	W_a	W_m	Observaciones
a) Habitación (casa-habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles correccionales, hospitales y similares	70 (0.70)	90 (0.9)	170 (1.7)	(1)
b) Oficinas, despachos y laboratorios	100 (1.0)	180 (1.8)	250 (2.5)	(2)
c) Comunicación para peatones (pasillos, escaleras, rampas vestíbulos y pasajes de acceso libre al público)	40 (0.4)	150 (1.5)	350 (3.5)	(3), (4)
d) Estadios y lugares de reunión sin asientos individuales	40 (0.4)	350 (3.5)	450 (4.5)	(5)
e) Otros lugares de reunión (templos, cines, teatros, gimnasios, salones de baile, restaurantes, bibliotecas, aulas, salas de juego y similares)	40 (0.4)	250 (2.5)	350 (3.5)	(5)
f) Comercios, fábricas y bodegas	0.8 W_m	0.9 W_m	W_m	(6)
g) Cubiertas y azoteas con pendiente no mayor de 5%	15 (0.15)	70 (0.7)	100 (1.0)	(4), (7)
h) Cubiertas y azoteas con pendiente mayor de 5%	5 (0.05)	20 (0.2)	40 (0.4)	(4)(7)(8)
i) Volados en vía pública (marquesinas balcones y similares)	15 (1.5)	70 (0.70)	300 (3.0)	
j) Garajes y estacionamientos (para automóviles exclusivamente)	40 (0.4)	100 (1.0)	250 (2.5)	(9)

Imagen 1.33 Valores mínimos aceptables de cargas vivas unitarias para diseño estructural

Fuente: Reglamento de Construcciones del Municipio de Mérida Yucatán, México

1.10 AUTOCONSTRUCTIBILIDAD

Puede asumirse que la "facilidad" o "simplicidad" para llevar a cabo la construcción de una vivienda o de alguno de sus elementos es uno de los factores más importantes que caracterizan a las tecnologías apropiables definidas anteriormente; dicho factor se relaciona también con el proceso de autoconstrucción. En este sentido, el concepto de "autoconstructibilidad" se identificará como la "propiedad que posee un sistema constructivo, a través de la cual podrá ser realizado por medio de

la autoconstrucción", o "facilidad de los procesos constructivos para llevarse a cabo por el usuario mismo". En este sentido, conceptos como "autoconstrucción" y "constructibilidad" serán previamente definidos e incluidos en el concepto de autoconstructibilidad, dado ambos que están intrínsecamente relacionados.

Constructibilidad

Por un lado, la constructubilidad ha tenido diversas definiciones, dentro de las que destacan la emitida por el CIRIA (Construction Industry Research and Information Asocciation) en 1983, la cual declara la constructibilidad (en inglés "buildability") como *"el grado en el cual el diseño facilita la construcción de un edificio, sujetándose a todos los requerimientos necesarios para llevarla a cabo"*[54].

Por otro lado el CII (*Construction Industry Institute*) de la Universidad de Texas se refiere a la constructibilidad como "*la óptima integración del conocimiento y experiencia constructivos para alcanzar los objetivos generales del proyecto*"[55].

Una conceptualización un tanto más sencilla la realiza la Dra. Deissy Alarcón (2005) al establecerla como "*el grado de simplicidad del proceso constructivo*" en la relación entre el diseño y la construcción[56].

Del mismo modo el Dr. Marcos Serer (2004) define la constructibilidad como la "*capacidad que tiene el diseño de un artefacto o unidad de actuación de ser más o menos construible por métodos razonables*"[57].

---

[54] CIRIA, 1983 en Crowther, Philip, 2002, "Design por buildability and the deconstruction consequenses", **Design for Deconstruction and Materials Reuse,** Publicación CIB 272, Karlsruhe, Alemania.

[55] CII, en Crowther, Philip, 2002, "Design por buildability and the deconstruction consequenses", **Design for Deconstruction and Materials Reuse,** Publicación CIB 272, Karlsruhe, Alemania.

[56] Alarcón, Deissy, 2005, **Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles**, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, España.

Autoconstrucción

Por su parte, la autoconstrucción puede referirse básicamente a que los procesos constructivos de vivienda son llevados por los habitantes mismos, asumiendo en estos, ciertas características de precariedad.

Dentro de las características básicas de la autoconstrucción encontramos el hecho de que dicho proceso (enfocado en la producción de vivienda) suele ajustarse al ritmo de ahorro de la familia[58], por lo que su desarrollo se lleva a cabo de manera progresiva[59].

Salas (1992) menciona que el proceso de autoconstrucción supone hablar también de autodiseño, autogestión, métodos de autoayuda, bancos de materiales y construcción progresiva. Así mismo menciona que, la mayoría de los procesos de autoconstrucción que ha estudiado "*se sustentan en el esfuerzo de cada familia y en sistemas de ayuda, cuya eficiencia y eficacia aumentan según el nivel de organización, sistematización y gestión, que permitan un mejor producto y la optimización de los recursos*".

En relación a los recursos empleados en la autoconstrucción, tanto materiales como técnicos, González Lobo (1998) menciona que "*construir con más voluntad que recursos, distiende la energía inventiva y obliga a recuperar las técnicas tradicionales baratas (...) y la reducción hasta el límite en la utilización de materiales constructivos caros, pero necesarios*". Salas (1992) por su parte, menciona que la autoconstrucción abarca "*desde los niveles más primarios de la tecnología, hasta los que generan*

---

[57]Serer, Marcos, 2004, **Modelo estratégico (SM) para le gestión de proyectos de carácter único,** tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Proyectos de Ingeniería, Barcelona, España.

[58] González Lobo (1998).

[59] Salas (1992).

productos de industrialización ligera, dejando fuera los sistemas sofisticados de alta tecnología que suponen importación y sustitución de la mano de obra (...)".

Otro componente importante de la autoconstrucción lo encontramos en las distintas modalidades de participación comunitaria, la cual ha estado presente desde nuestro pasado prehispánico al enfocarse por lo general en la realización de obras de interés común. Cabe aclarar que el estudio de dicho componente, a pesar de su importancia, no será objetivo de esta investigación, dado que el enfoque de ésta es particularmente técnico.

Autoconstructibilidad: amalgama de conceptos

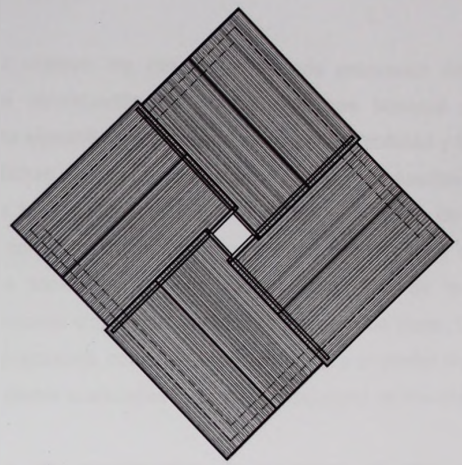
Dadas las semejanzas entre los conceptos de "constructibilidad" y "autoconstrucción", finalmente, consideraremos a la "autoconstructibildad" como una amalgama de ambos. Cabe será señalar que dicho término, si bien no posee una definición "oficial", no deberá confundirse con la "capacidad o cualidad de construirse a sí mismo".

Es importante saber que, si bien la constructibilidad y la autoconstrucción se enfocan en la obtención de un producto construido (un objeto físico), la cualidad o atributo de "autoconstructibilidad" será considerado subjetiva en cuanto que involucra diversas características heterogéneas no necesariamente cuantificables.

Por lo anterior, podremos considerar que un sistema constructivo aplicado a la vivienda o a alguno de sus componentes, será autoconstruíble en la medida en que:

- El diseño y/o planeación previos faciliten su construcción.
- Integre tanto el conocimiento como la experiencia constructivos.
- Otorgue simplicidad al proceso constructivo.

- Se ajuste al ahorro de la familia.
- Se lleve a cabo de manera progresiva.
- Incluya autodiseño y autogestión.
- Optimice los recursos y aumente su eficacia y eficiencia a través de la organización y sistematización.
- Recupere las técnicas tradicionales baratas.
- Reduzca al límite la utilización de materiales constructivos costosos.
- Deje fuera de consideración el uso los sistemas sofisticados de alta tecnología.



CAPÍTULO 2

Metodología y desarrollo de la propuesta

CAPÍTULO 2
METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2.1 METODOLOGÍA

Dado que el objetivo fue desarrollar de una propuesta de techumbre implicando la construcción de un prototipo que buscara cumplir con características específicas (seguridad, autoconstructibilidad y bajo impacto ambiental), dichas características tuvieron que ser analizadas a través de experimentos bajo circunstancias controladas, así como de un análisis documental, con la finalidad de obtener datos cualitativos y cuantitativos expresados a través de gráficas, planos, y análisis de las imágenes registradas durante el proceso, los cuales sirvieron de base, tanto para el diseño de la propuesta, como para la verificación y posterior determinación y evaluación de las cualidades buscadas como parte de los objetivos.

En cuanto a los experimentos, se incluyeron diversas pruebas de laboratorio así como trabajos de construcción y montaje, a partir de los cuales fueron obtenidos datos cualitativos y cuantitativos que sirvieron para determinar la seguridad y la autoconstructibilidad del sistema desarrollado.

De manera general, el desarrollo de la techumbre alternativa incluyó principalmente cinco elementos: el material, la geometría, la estructura, la cubierta, y el proceso constructivo, los cuales fueron sometidos a diversas pruebas y/o análisis, y cuyos resultados se relacionaron directamente con los objetivos establecidos en el trabajo de investigación.

Las pruebas de laboratorio se enfocaron en dar cuenta de las capacidades mecánicas tanto del material base (bambú), así como de la estructura y del sistema de techumbre final. Estas pruebas fueron llevadas a cabo en

la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY), con las que se obtuvieron datos respecto a las cualidades mecánicas básicas de la especie de bambú *dendrocalamus strictus*. Las pruebas realizadas se enfocaron en obtener los esfuerzos de Tensión paralela, Compresión paralela y Flexión, a partir de la Mecánica clásica de los materiales (Imágenes 2.1 y 2.1.1), de modo que pudieron preverse ciertas reacciones resultado de la aplicación de cargas al prototipo.

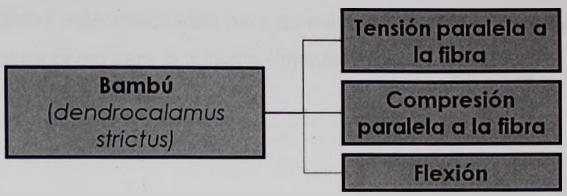


Imagen 2.1 Pruebas mecánicas básicas

Dibujo: Carlos Uribe

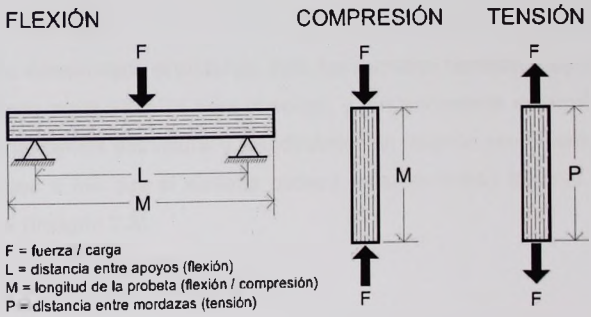


Imagen 2.1.1 Esquemas de Flexión, Compresión y Tensión

Dibujo: Carlos Uribe

Paralelamente, se llevó a cabo el diseño de la techumbre, el cual partió de las características geométricas ofrecidas por el material así como de sus cualidades mecánicas obtenidas posteriormente. Durante este proceso se hicieron diversos bocetos conceptuales para analizar las posibilidades geométricas, atendiendo en primer lugar a la necesidad de cubrir una superficie definida, así como a la estética y facilidad constructiva.

Posteriormente se llevó a cabo la construcción del prototipo. A raíz de esta experiencia se identificaron, en un primer acercamiento, las técnicas y herramientas más adecuadas para su manufactura y montaje, tanto para la estructura como para la cubierta (Imagen 2.2).

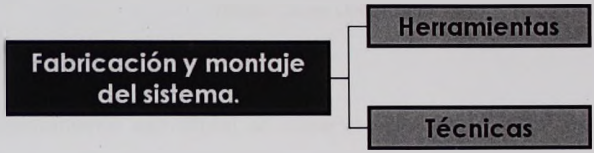


Imagen 2.2 Proceso de fabricación y montaje

Dibujo: Carlos Uribe

Una vez desarrollado el prototipo, éste fue sometido también a estudios de laboratorio en la FIUADY para observar, y posteriormente determinar sus comportamientos estructural y aerodinámico en relación con diversos tipos de cargas a los que el sistema pudiera estar sometido durante su uso habitual (Imagen 2.3).

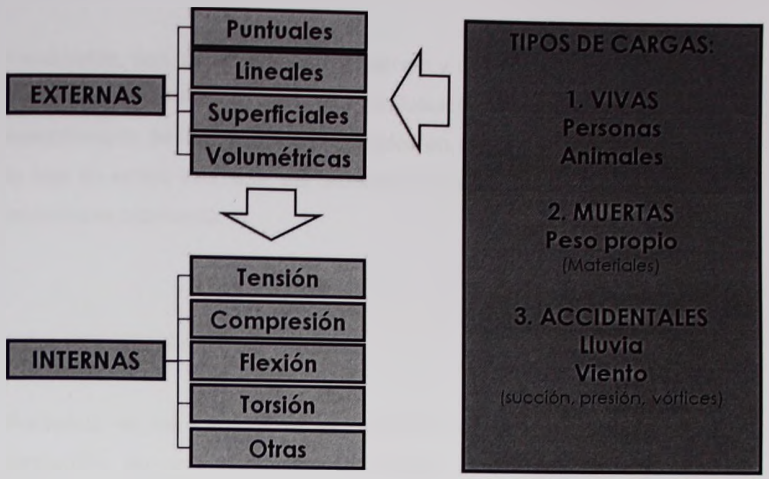


Imagen 2.3 Cargas y resistencias en el prototipo

Dibujo: Carlos Uribe

El comportamiento estructural se observó a partir de la aplicación de cargas puntuales en la estructura, de modo que la deformación y recuperación pudieran ser medidas en diversos puntos y en consecuencia pudiera ser determinada su rigidez.

El comportamiento aerodinámico se observó a través de pruebas en el túnel de viento, con lo que posteriormente se determinó dicho comportamiento en relación a diversas velocidades de viento incidentes en la cubierta.

Así mismo se realizó una comparativa con otros sistemas de techumbre comúnmente empleados en la vivienda autogestionada, en la que se observaron las diferencias en cuanto al peso total del sistema, costos, durabilidad y cantidad de acero contenido, de modo que pudieron establecerse las ventajas del sistema de bambú en comparación con cada uno de los otros sistemas.

Finalmente, con los resultados cualitativos y cuantitativos emitidos a modo de síntesis, se llevó a cabo una evaluación que determinó el nivel de cumplimiento de los objetivos planteados en relación al marco teórico, con lo que se emitió una tesis del proceso de investigación y desarrollo de la techumbre planteada.

2.2 ANTECEDENTES DE DISEÑO

Partiendo de las características básicas que se buscó satisfacer en el desarrollo de una techumbre alternativa como son la seguridad, la posibilidad de ser autoconstruída, y que su desarrollo no implique un impacto ambiental negativo en ninguno de sus procesos (elaboración, uso y descarte), el siguiente paso fue identificar materiales de la región que pudiesen cumplir con estas características, definir a grandes rasgos su situación actual y así saber en qué contexto se inserta el bambú como un material a emplear en el desarrollo de un sistema constructivo alternativo.

Materiales de la región

Una de las primeras ideas fue identificar los materiales empleados por nuestros antepasados, en las épocas donde los procesos constructivos aún no implicaban un deterioro ambiental significativo. En nuestro medio esto se refiere principalmente al uso de materiales pétreos, térreos y vegetales, tales como la piedra laja, la cal, el *kankab* y el *saskab*, el sistema de bahareque, la paja y las hojas de diversos tipos de palma, por mencionar a los más conocidos.

En relación a estos materiales, puede mencionarse a grandes rasgos que aquellos provenientes de la vegetación poseen una particular desventaja respecto de los otros dos (pétreos y térreos), ya que su relativamente lento

proceso de crecimiento y la ausencia de una cultura del cultivo y la reforestación hacen su uso poco viable, además de que han sido sustituidos por materiales industrializados, cuya cantidad y disponibilidad cumplen con las actuales demandas de vivienda.

La palma de "huano"

El uso de la palma de "huano" o "guano" (nombre regional empleado para el género "*sabal*", y en particular las especies *sabal yapa y sabal mexicana*) tiene particular importancia dado que es uno de los materiales más empleados en la construcción de techumbre en la vivienda tradicional maya (Imagen 2.4). Al respecto, Beatrice Trueblood (1978) menciona que:

"*Después de la madera, ningún otro material alcanza tanta importancia como la hoja de palma, que se emplea para cubrir las techumbres con ventajas a cualquier otro material vegetal. Su uso es común en Yucatán y al norte de Chiapas donde las casas se construyen casi en su totalidad con palma (...)*"[1].

Sin embargo, el uso de la palma de huano ha dejado de ser solamente doméstico, y ha pasado a ser un material con mucha demanda en la industria turística para techar palapas, lo cual, sumado al crecimiento demográfico, la acelerada deforestación y los cambios en la economía regional y formas de uso del suelo, se han traducido en una decreciente disponibilidad de este recurso[2].

---

[1] Trueblood, Beatrice, Miguel Ángel Corzo, 1978, **Vivienda campesina en México**, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), México, 224pp.

[2] Caballero Nieto, J., A. Martínez y V. Gama. 2001, **El uso y manejo tradicional de la palma de guano en el área maya de Yucatán**. CONABIO. Biodiversitas 39: 1-6, México.

Imagen 2.4 Techado tradicional con palma de huano (*sabal yapa*)
Fuente: http://www.backyardnature.net/yucatan/huano.htm

Selección del bambú como materia prima base

Por lo anterior, en caso de recurrir a recursos vegetales, éstos deberían poder satisfacer las necesidades del sector vivienda, tanto en su disponibilidad, costo y calidad.

Dadas sus cualidades anteriormente mencionadas, el bambú se presentó como una alternativa capaz de satisfacer las carencias que las especies vegetales tradicionales presentan actualmente, a pesar de tratarse de una especie no-endémica, y de no figurar como un elemento constructivo en la vivienda vernácula yucateca.

En este sentido, el empleo del bambú en el desarrollo de un sistema alternativo de techumbre se planteó en una primera etapa como una alternativa viable, en relación con el bajo impacto ecológico buscado, con su disponibilidad y con sus cualidades constructivas, así como la posibilidad de ser adoptado como un nuevo material constructivo en las áreas en donde el nivel de ingresos o la accesibilidad no permiten el uso

de materiales industrializados de un modo satisfactorio, características todas relacionadas con el objetivo planteado y con la bioconstrucción:

- En un material de bajo impacto ambiental, que no contribuye a la degradación medioambiental en ningún momento de su ciclo vital.
- Su extracción puede realizarse mediante procesos relativamente sencillos y de bajo costo.
- Es un material alternativo a la producción de industrias contaminantes.
- Posee un costo de transformación relativamente bajo.
- Aprovecha al máximo los recursos naturales locales disponibles.
- Plantea la posibilidad de autoconstrucción.

Costos iniciales

Cabe señalar que como toda tecnología alternativa, los costos iniciales de la propuesta a desarrollar pueden ser semejantes (o en algunos casos mayores) en comparación con el sistema de techumbre convencional a base de viguetas y bovedillas, dado que la producción industrializada de materiales implica naturalmente un menor costo en los productos finales.

Por otro lado, la realidad de un futuro incierto para los materiales para construcción cuya producción depende del petróleo (particularmente el cemento y el acero), sumado a la posibilidad de desarrollar una producción y comercialización sistematizada tanto del bambú como de sus productos derivados, así como el ahorro en mano de obra que representa la autoconstrucción, justifican en un principio los costos, cuya implementación y posterior adopción en el quehacer constructivo cotidiano derivarían no solo en una reducción de costos monetarios, sino también en bajos costos ambientales.

Propuesta "*Prêt-à-porter*"

"*Prêt-à-porter*" es una expresión en francés que textualmente significa "listo para llevar". Esta se refiere a aquellas prendas de moda producidas en serie cuyos patrones de repetición están en función de la demanda[3].

La adopción de esta definición se debe a que la propuesta desarrollada no pretendió ser un modelo que se adecuara a las necesidades particulares de cada caso de vivienda autogestionada, ni tampoco ser un modelo adecuado para todos los casos. Buscó más bien cumplir con las cualidades básicas que la techumbre debería poseer, y al mismo tiempo ser una propuesta ecológica y sustentable, todo esto a partir de una propuesta genérica basada en un módulo "tipo", cuya utilización plantearía la posibilidad de satisfacer la demanda de techumbre en la vivienda autogestionada, así como en el caso de algún fenómeno natural destructivo, además de ser una alternativa accesible a un sector socioeconómico más amplio.

2.3 MATERIAL, ELEMENTOS Y GEOMETRÍAS

Las características de los materiales definen en cierto modo las geometrías a adoptar. Partiendo de que tanto la caña de bambú, como el panel hecho de cañas de bambú unidas por alambres resulta una opción susceptible de modulación (Imágenes 2.5 y 2.6), las geometrías a desarrollar restringieron su uso a elementos lineales y a superficies regladas.

[3] **Prêt-à-porter**, [http://es.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%AAt-%C3%A0-porter]

Imagen 2.5 Cañas de Bambú, hacienda Xixim Yucatán

Fotografía: Luis Llovera

Imagen 2.6 Paneles de Bambú, hacienda Xixim Yucatán

Fotografía: Luis Llovera

Una superficie reglada es aquella "*generada por el movimiento de una recta, denominada generatriz, manteniéndose en contacto con otra u otras líneas, denominadas directrices, cumpliendo además en su desplazamiento ciertas condiciones particulares*"[4] (Imagen 2.7).

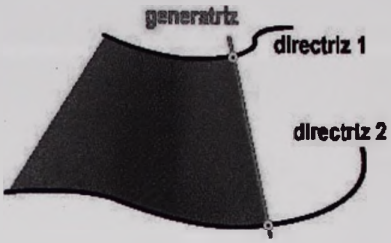


Imagen 2.7 Superficie reglada Fuente: http://webdelprofesor.ula.ve

Son varias las soluciones que se pueden obtener mediante el uso de las superficies regladas. Tomando en cuenta las caracteristicas del panel tipo, la solución adoptada fue la de geometría del "paraboloide hiperbólico", el cual pertenece a las conocidas como "superficies alabeadas" (Imágenes 2.8 y 2.9).

[4] "**Superficies Regladas**", [http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/teoria/cap_01a-conceptos_geometricos/05-superficie.htm#supregala]

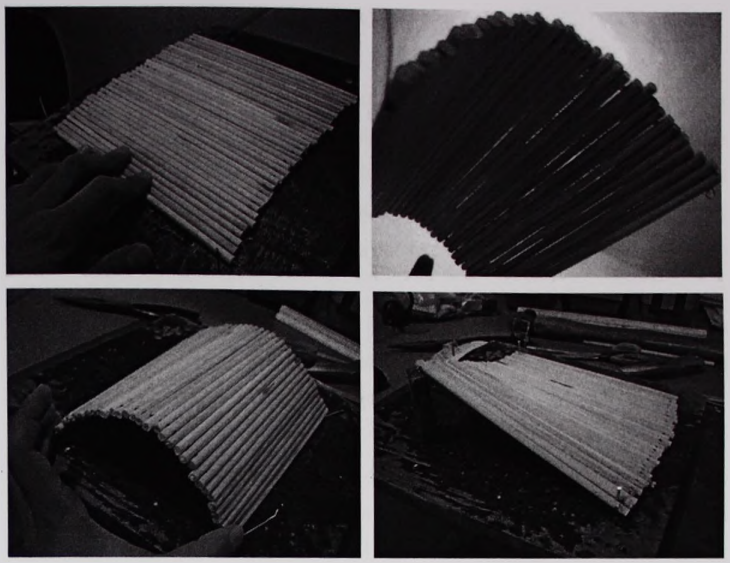


Imagen 2.8 Posibilidades geométricas del panel tipo

Fotografías: Carlos Uribe

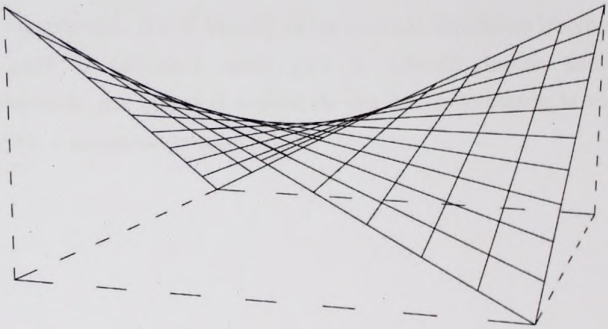


Imagen 2.9 Paraboloide hiperbólico

Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/Hyperbolic-paraboloid.jpg

2.4 PROCESO DE DISEÑO DE LA PROPUESTA

Considerando los objetivos del desarrollo de una propuesta de techumbre alternativa, (seguridad, constructubilidad y bajo impacto ambiental), se pensó en una propuesta genérica que estuviese enfocada en el cumplimiento de estas premisas, y que al mismo tiempo se adaptara a las características geométricas ofrecidas por el material a emplear (bambú).

Las dimensiones generales de la techumbre partieron de la caracterización de la "vivienda tipo" previamente descrita, siendo el objetivo cubrir un área general de 4 x 4 m.

El sistema constructivo fue pensado como la conjunción de dos elementos principales: la estructura y la cubierta, los cuales habrían de ser elaborados con el mismo material, con el objetivo de optimizar los recursos, así como evitar el exceso de materiales distintos, lo cual haría más complicada su obtención.

Debe mencionarse que el estudio de las diversas soluciones geométricas, tanto para la estructura como para la cubierta, fueron abordadas paralelamente, por lo que el análisis de una iba conformando la solución de la otra, y viceversa (Imagen 2.10).

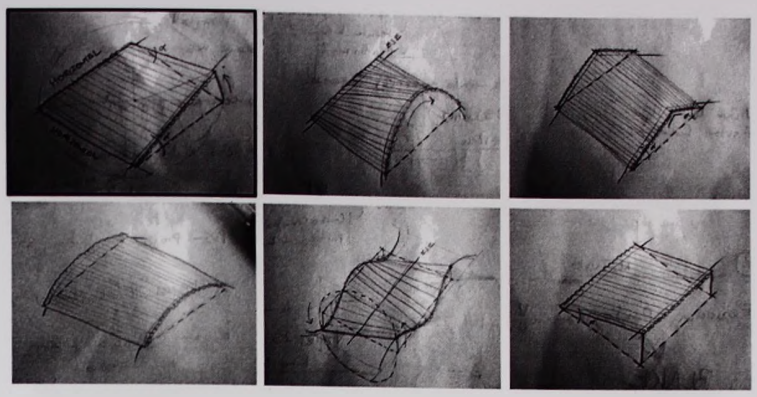


Imagen 2.10 Posibles soluciones geométricas para la cubierta

Dibujos: Carlos Uribe

La estructura

Previamente analizadas diversas opciones geométricas, se optó por el uso de una estructura a cuatro aguas, a partir de un artículo publicado en el libro, "Un techo para vivir. Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina" (Gálligo, 2005), en el cual se muestra el sistema de "Barras de madera" que a continuación se menciona:

"*El punto de partida del sistema es el juego de sobremesa de los 'palillos' o mondadientes, que se someten a un cambio de escala en el que se sustituyen por barras de madera, lo que permite cubrir de una manera muy sencilla luces de 3, 4 o más metros. El número de barras utilizado es de 3 como mínimo, hasta el máximo necesario para que el vacío entre ellas sea el deseado. La tecnología es una propuesta del Arq. Francisco Montero. Está desarrollada incipientemente, lo que permite, dada su sencillez conceptual, ser asumida y perfeccionada por cualquier centro de I+D o de producción de vivienda*"[5] (Imagen 2.11).

[5] Gálligo (2005).

Imagen 2.11 Sistema de barras de madera

Fuente: "Un techo para vivir", Gálligo (2005)

Partiendo de esta idea básica, el siguiente paso fue entonces retomarla y perfeccionarla de modo que pudiera ser empleada en el desarrollo de la propuesta de techumbre (Imagen 2.12).

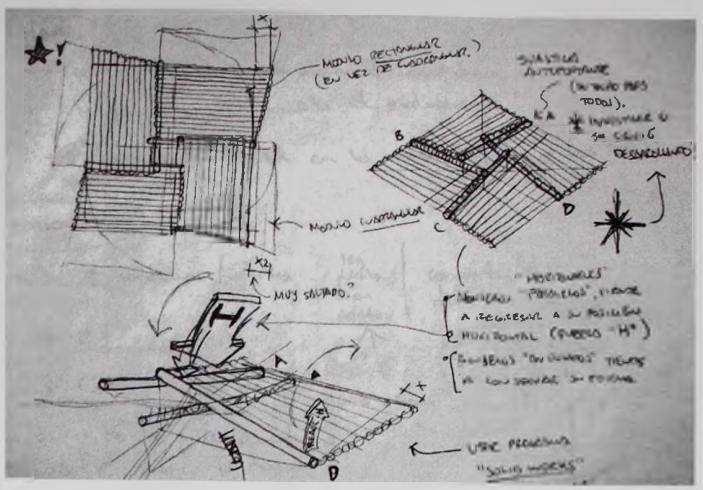


Imagen 2.12 Reinterpretación del sistema de "barras de madera"

Dibujos: Carlos Uribe

Después de una serie de experimentos, y dadas las características geométricas del bambú, se optó por una estructura a base de cuatro "vigas dobles" hechas con cañas de 2.50 m de longitud y 4.5 cm de diámetro, unidas en dos puntos cada una, de modo que la distancia de dos diámetros obtenida permitiera obtener un peralte aproximado del 20% en cada uno de los cuatro lados. A su vez, las vigas se sujetan a un marco cuadrado hecho a base de cañas de 3 m de longitud y 4.5 cm de diámetro, el cual funciona como guía o escantillón, para poder ser armado a nivel de piso, y posteriormente instalado en la parte superior del módulo tipo. Una vez colocado en su posición final, es posible prescindir de este marco, sin embargo puede conservarse en caso de que no exista en el perímetro de los muros una guía fija (Imágenes 2.13, 2.14 y 2.15).

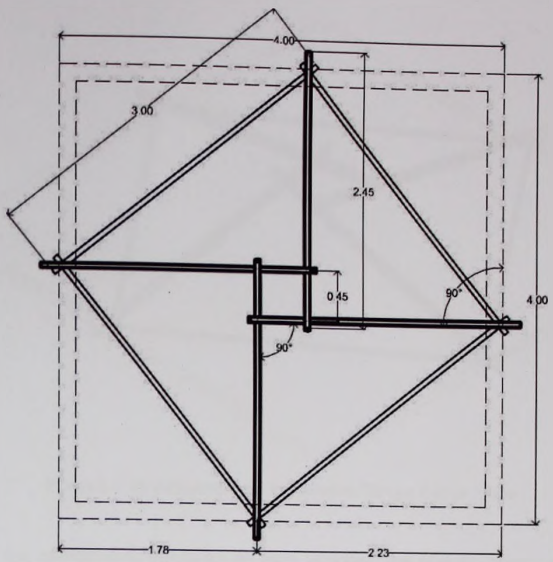


Imagen 2.13 Estructura en Planta Dibujo: Carlos Uribe

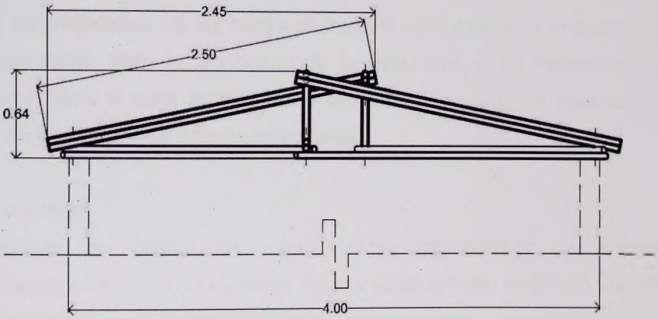


Imagen 2.14 Estructura en Alzado Dibujo: Carlos Uribe

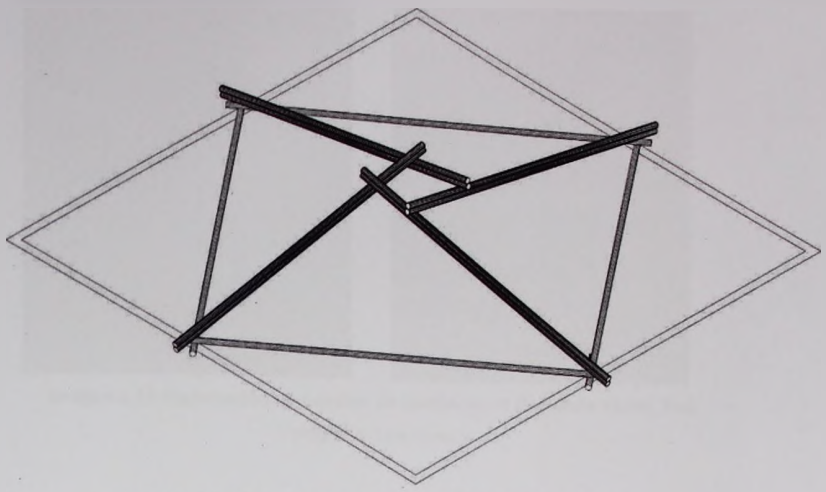


Imagen 2.15 Estructura en Isométrico Dibujo: Carlos Uribe

Una de las principales ventajas de este proceso, es que se prescinde de la madera, además de que su preparación no requiere gasto de energía para su maquinado (el sistema de barras de madera emplea polines regulares y rectangulares que implican un proceso de transformación). Por otro lado, las irregularidades de las cañas de bambú no implican un impedimento determinante para la fabricación de la estructura, y su tratamiento se puede hacer a base de productos reciclados como diesel quemado, y pocas cantidades de aditivos industriales.

La cubierta

Tomando en cuenta las características geométricas del bambú, principalmente como un elemento rígido y relativamente rectilíneo, se optó por el manejo de paneles modulares, los cuales, por ser elementos simples, pueden ser producidos en serie (Imagen 2.16).

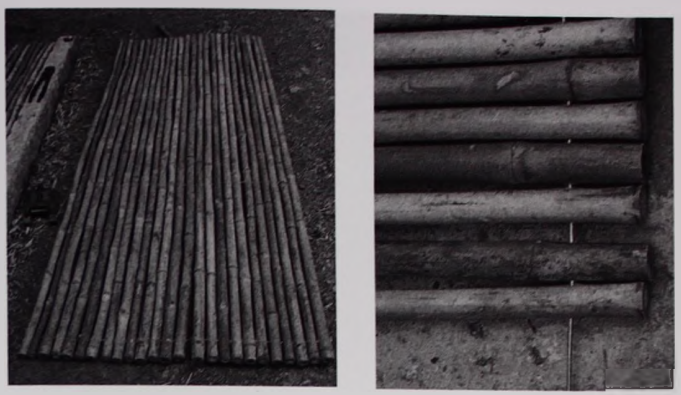


Imagen 2.16 Elaboración de paneles de bambú en la Hacienda Xixim, Yuc.

Fotografía: Luis Llovera

Por otro lado, las características geométricas señaladas, si bien restringen su uso a superficies regladas, ofrecen por otro lado una gran variedad de soluciones derivadas de este tipo de superficies. Considerando que la estructura quedó definida como una superficie a cuatro aguas, generando a su vez cuatro cuadrantes, los paneles se colocaron a manera de paraboloide hiperbólico con el cual se solucionó la geometría final de la techumbre (Imágenes 2.17 y 2.18).

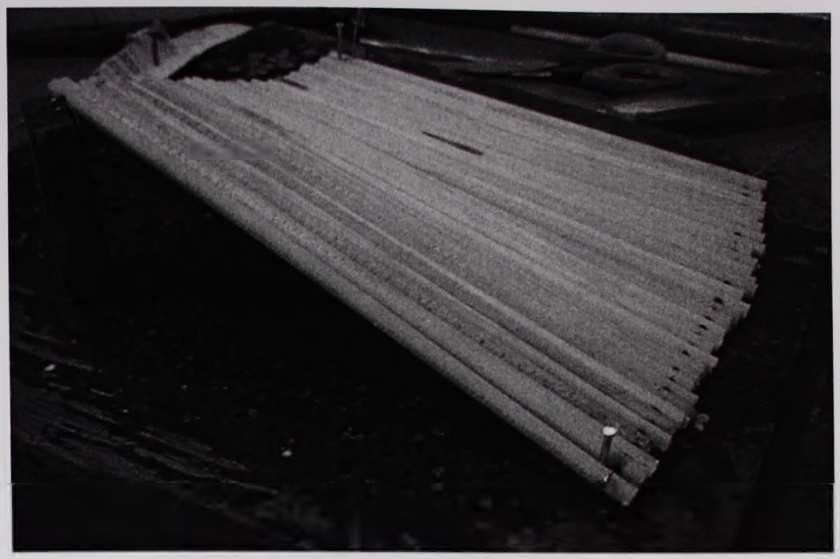


Imagen 2.17 Paraboloide hiperbólico (maqueta)

Fotografía: Carlos Uribe

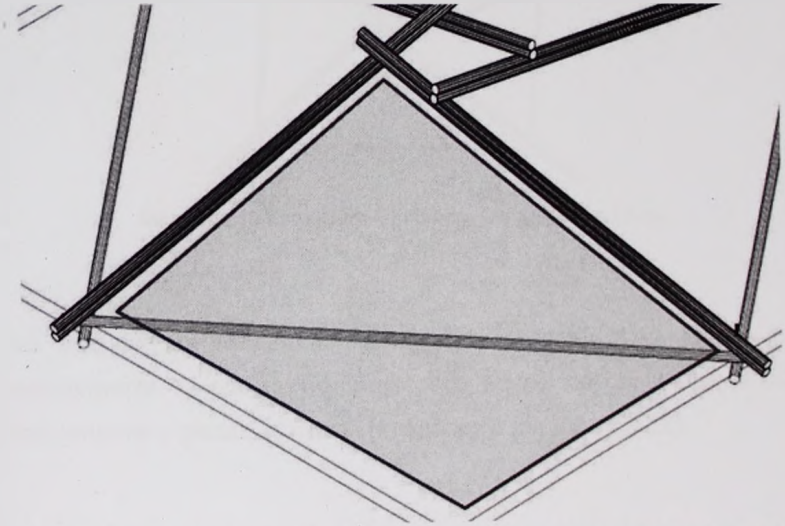


Imagen 2.18 Paraboloide hiperbólico en uno de los cuadrantes generados por la estructura. Dibujo: Carlos Uribe

Estructura + Cubierta

Finalmente, fueron ensambladas la estructura y la cubierta, obteniendo así el sistema básico de techumbre propuesto (Imagen 2.19).

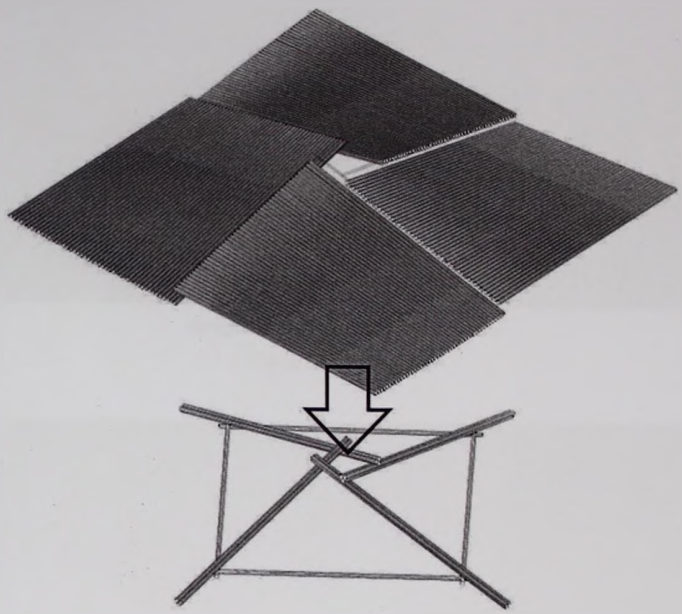


Imagen 2.19 Estructura + cubierta. Dibujo: Carlos Uribe

Para este fin fue elaborada una maqueta a escala 1:10, con la que posteriormente se pudieron analizar otros elementos constructivos tales como amarres y piezas auxiliares (Imágenes 2.20, 2.21 y 2.22).

Imagen 2.20 Maqueta, vista superior

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 2.21 Maqueta, vista lateral esquinada

Fotografía: Carlos Uribe

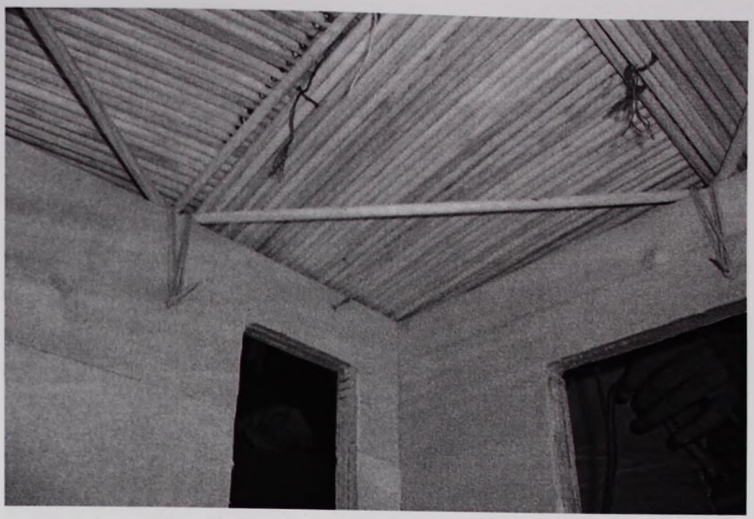


Imagen 2.22 Maqueta, vista interior
Fotografía: Carlos Uribe

Dentro de las principales intenciones a incluir en este sistema de techumbre, se encontró la posibilidad de desmontaje y reutilización de sus elementos, con lo que se minimizaría la inversión de recursos y la generación de residuos, fomentando la cultura de la reducción, la reutilización y el reciclaje.

2.5 OBTENCIÓN DEL MATERIAL

Como parte del trabajo de campo, debe mencionarse la importancia de obtención de los recursos económicos y materiales, como un elemento del proceso de investigación y la experimentación.

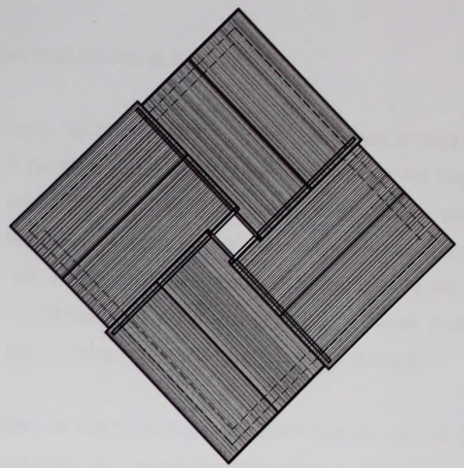
En este caso en particular, fue necesario plantear la necesidad de obtener material suficiente para la elaboración de un modelo a escala real, ya que esto representaba parte de los objetivos planteados. En este sentido, se

acordó un intercambio con el encargado la Hacienda Xixim, el cual aportó el material requerido para el proyecto de investigación a cambio de los resultados de las pruebas mecánicas hechas en laboratorio, pues hasta ese momento no contaban con pruebas científicas que avalaran la calidad y resistencia de su producto.

Puede observarse así, que en el medio existen empresas interesadas en el desarrollo de proyectos de investigación, cuyos resultados adquieren pertinencia ante la posibilidad de aplicaciones futuras en la realidad cotidiana (Imagen 2.23).

Imagen 2.23 Carga de cañas y paneles en la hacienda Xixim Yuc.

Fotografía: Carlos Uribe



CAPÍTULO 3

Pruebas y resultados

CAPÍTULO 3
PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1 PRUEBAS MECÁNICAS

3.1.1 Pruebas mecánicas al bambú

En este apartado, se presentan los resultados de las pruebas de esfuerzo a compresión paralela a las fibras, tensión paralela a las fibras, flexión, y momentos máximos (flexión) con fines investigativos, para muestras experimentales de la especie de bambú "*dendrocalamus strictus*" cosechadas en la hacienda Xixim, en el municipio de Muna, Yucatán, siguiendo los criterios para pruebas mecánicas básicas, empleando para ello una prensa universal con capacidad de 60 toneladas.

Con lo anterior, se buscó conocer la factibilidad de uso de esta especie, para la construcción de elementos aplicables a vivienda, principalmente las techumbres, a partir de los resultados obtenidos en relación a sus cualidades mecánicas, comparándolos con las de otras especies de bambú, así como las de otros materiales comúnmente empleados en la industria de la construcción, y considerando su aplicación directa en fórmulas para el diseño de estructuras y/o elementos constructivos.

Procedimiento

1. Primero, se obtuvo la densidad relativa o "aparente" (PA/VV) (Peso Anhidro / Volumen Verde), para lo cual se tomaron cuatro especímenes de diversas dimensiones que fueron introducidas a un horno para eliminar su humedad (Imagen 3.1). Los especímenes fueron monitoreadas durante cuatro días consecutivos, obteniendo al cuarto día el peso anhidro del material, el cual, al dividirse entre su volumen verde, dio una densidad relativa promedio de 806 kg/m^3.

Imagen 3.1 Desecación del material

Fotografía: Carlos Uribe

2. Para realizar las pruebas mecánicas, los especímenes se seccionaron en cilindros de diferentes longitudes (probetas) según la prueba a la que serían destinados. Las dimensiones de las probetas empleadas en cada una de las pruebas pueden ser consultadas en el Anexo 1.

3. Para las pruebas de compresión paralela y flexión, fueron consideradas piezas con y sin nudos intermedios. (Imágenes 3.2 y 3.3)

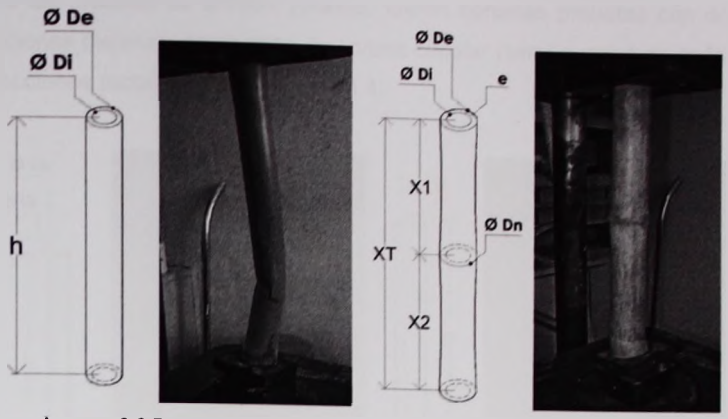


Imagen 3.2 Pruebas de compresión. Dibujo y fotografías: Carlos Uribe

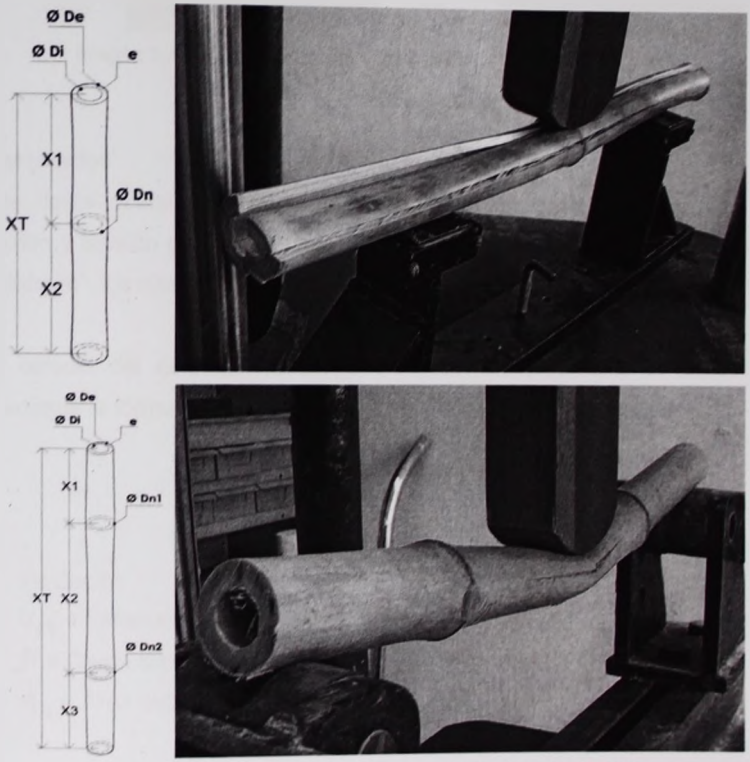


Imagen 3.3 Pruebas de Flexión. Dibujos y fotografías: Carlos Uribe.

4. Para las pruebas de tensión paralela, fueron cortadas probetas con dos secciones distintas: segmentos de corona circular (semi-cuartos de caña), y secciones rectangulares. (Imagen 3.4).

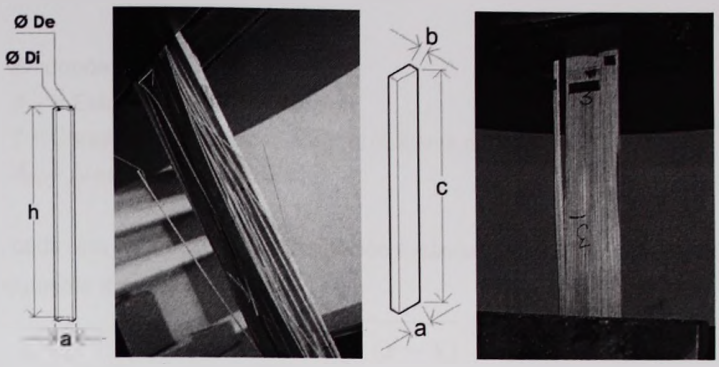


Imagen 3.4 Pruebas de Tensión. Dibujos y fotografías: Carlos Uribe

Resultados

Los datos obtenidos a partir de las pruebas de compresión paralela, flexión y tensión paralela representan Esfuerzos de Ruptura, o "esfuerzos máximos", los cuales se resumen a continuación a modo de gráficas.

El cálculo del esfuerzo de compresión paralela a la fibra se obtuvo mediante la fórmula:

$$\sigma_{c\parallel} = \frac{P}{A_n}$$

En donde:

$\sigma_{c\parallel}$ = Esfuerzo de compresión paralela.

P = Carga soportada por la probeta (o fuerza de compresión)

A_n = Área neta de la sección

El cálculo del esfuerzo de tensión paralela a la fibra se obtuvo mediante la fórmula:

$$\sigma_{t\parallel} = \frac{T}{A_n}$$

En donde:

$\sigma_{t\parallel}$ = Esfuerzo de tensión paralela

T = Carga soportada por la probeta (o fuerza de tensión)

A_n = Área neta de la sección

En cada uno de los casos, la Desviación Estándar fue calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x - \bar{x})}{n - 1}}$$

En donde:

σ = Desviación Estándar

x = cada uno de los valores de las pruebas

$\bar{x}$ = Promedio de las pruebas (media)

n = Número de especímenes probados

Para el cálculo del Momento Máximo en las pruebas de flexión a las cañas semicilíndricas de bambú, la fórmula empleada fue la siguiente:

$$M_{max} = \frac{PL}{4}$$

En donde:

M_{max} = Momento máximo

P = Carga máxima soportada por la probeta

L = Distancia entre apoyos

Para el cálculo del Esfuerzo Máximo (o resistencia) en las pruebas de flexión a las cañas semicilíndricas de bambú, la fórmula empleada fue la siguiente:

$$\sigma = \frac{(4M)(Re)}{\pi(Re^4 - Ri^4)}$$

En donde:

σ = Esfuerzo máximo

M = Momento máximo

Re = Radio exterior

Ri = Radio interior

El cálculo del Módulo de Elasticidad en las pruebas de flexión a las cañas semicilíndricas de bambú se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$E = \frac{64M}{\emptyset\pi(De^4 - Di^4)}$$

En donde:

E = Módulo de Eslasticidad

M = Momento máximo

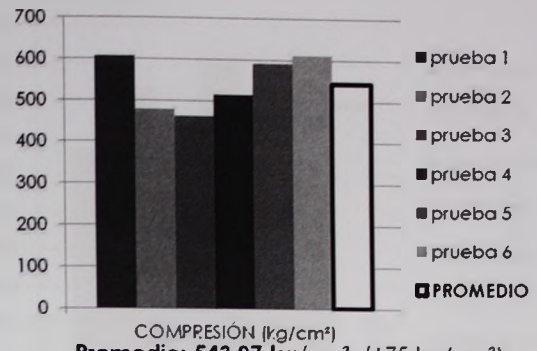
$\emptyset$ = Curvatura

De = Diámetro exterior

Di = Diámetro interior

Es importante aclarar que si bien el símbolo "σ" se emplea en dos fórmulas, éste pertenece a dos conceptos muy distintos; el primero se refiere a la Desviación Estándar, medida empleada en la Estadística descriptiva, mientras que el segundo se refiere al Esfuerzo Máximo, empleado en Física.

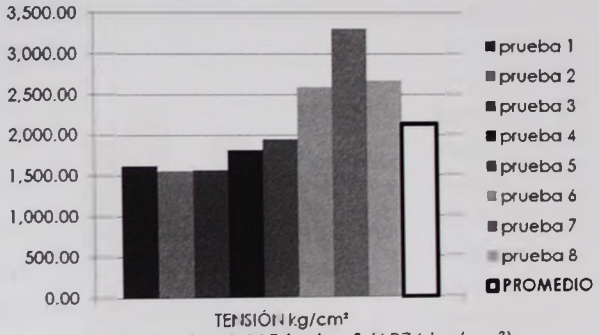
Gráfica 3.1 Pruebas de Compresión paralela a las fibras



Promedio: 543.97 kg/cm² (±75 kg/cm²)

Desviación Estándar: 66.71 kg/cm²

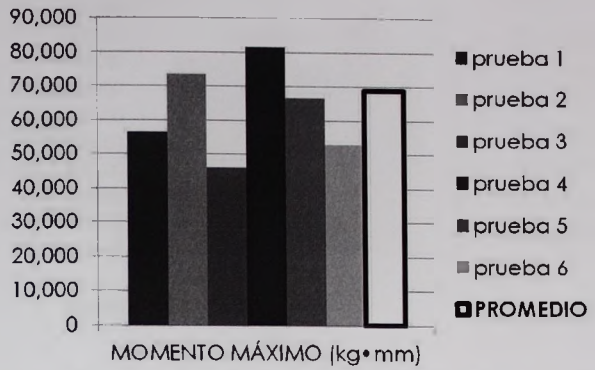
Gráfica 3.2 Pruebas de Tensión paralela a las fibras



Promedio: 2,135 kg/cm² (±874 kg/cm²)

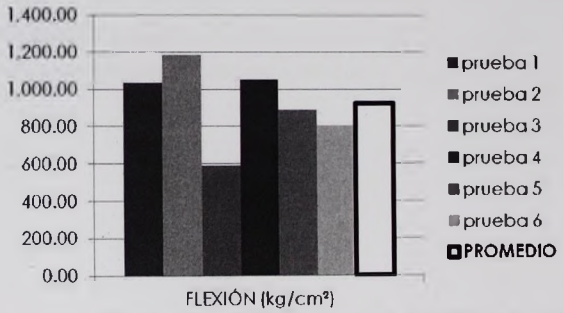
Desviación Estándar: 645.78 kg/cm²

Gráfica 3.3 Pruebas de Flexión (momento máximo)



Promedio: 68.8 kg•mm (±17.6 kg•mm)

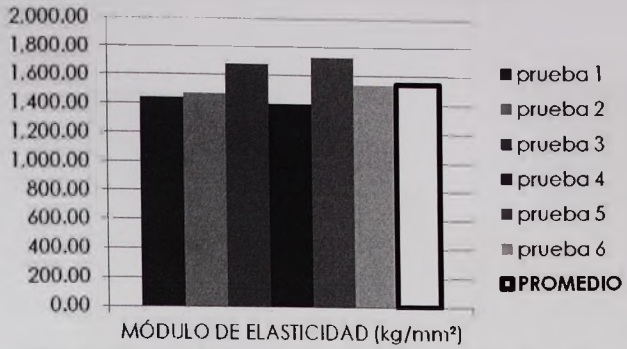
Gráfica 3.4 Pruebas de Flexión (resistencia)



Promedio: 925.01 kg/cm² (±297 kg/cm²)

Desviación Estándar: 211.27 kg/cm²

Gráfica 3.4.1 Pruebas de Flexión (módulo de elasticidad)

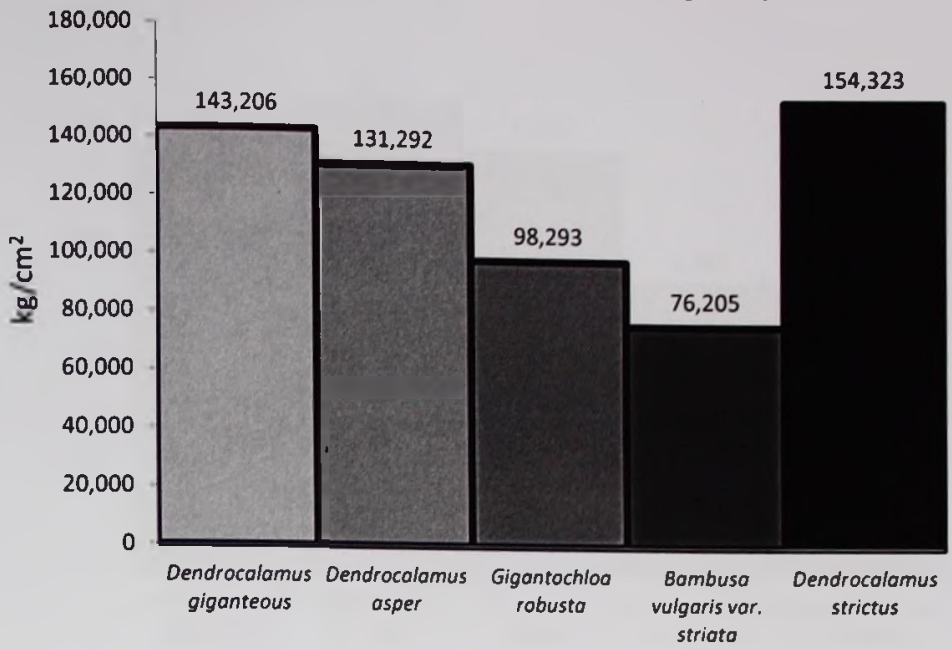


Promedio:154,323 kg/cm² (±16,400 kg/cm²)

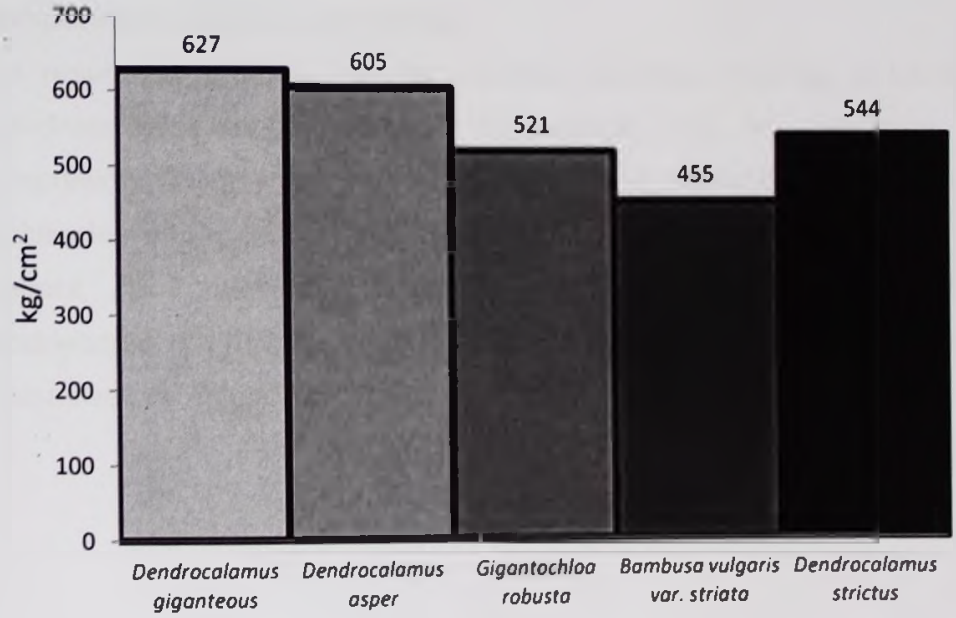
Comparativa con otras especies de bambú

Los resultados obtenidos en estas pruebas fueron comparados con los datos de otras especies de bambú indicados por Oscar Hidalgo (2003) en Minke (2010), particularmente el Módulo de elasticidad (indicado en el Anexo 1 para el caso del *dendrocalamus strictus*), Resistencia a la compresión paralela y Resistencia a la tensión paralela, datos en común para cada caso, los cuales se indican en la gráficas 3.5, 3.6 y 3.7.

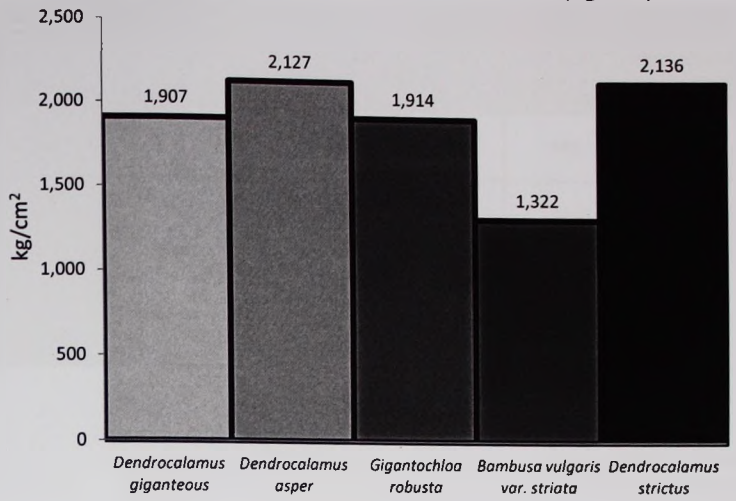
Gráfica 3.5 Módulo de elasticidad (kg/cm²)



Gráfica 3.6 Resistencia a la Compresión paralela (kg/cm²)



Gráfica 3.7 Resistencia a la Tensión paralela (kg/cm²)



Comparativa con otros materiales

Los resultados promedio de las pruebas mecánicas hechas al bambú (*dendrocalamus strictus*) fueron comparados con los esfuerzos a compresión, flexión y tensión que presentan otros materiales comúnmente empleados en la construcción, específicamente el acero, el concreto y la madera. Así mismo se comparó la densidad, de modo que pudiera establecerse una relación entre resistencia y densidad en cada uno de los materiales probados (Tabla 3.1).

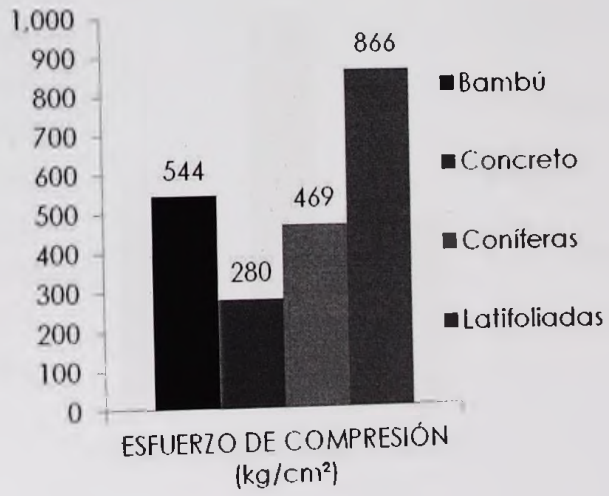
Tabla 3.1 Comparativa entre el bambú y otros materiales.

	BAMBÚ (*dendrocalamus strictus*)	CONCRETO (uso generalizado)	ACERO (grado 42)	MADERA DE ESPECIES CONÍFERAS Clase B (Pino chino*)	MADERA DE ESPECIES LATIFOLIADAS Grupo I (Machiche**)
Esfuerzo de Compresión. (kg/cm^2)	**544**	280	N/E	469	866
Esfuerzo de Flexión. (kg/cm^2)	**925**	41	N/E	917	1,988
Esfuerzo de Tensión. (kg/cm^2)	**2,136**	34	4,200	908	1,999
Densidad (kg/m^3)	**806**	2,320	7,850	540	850

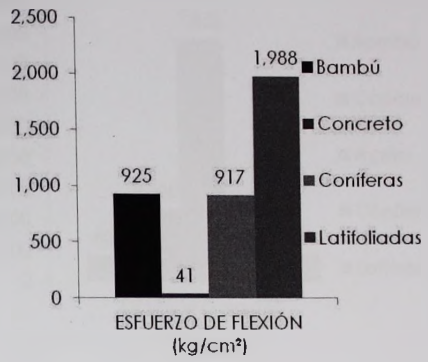
La tabla indica valores promedio para cada caso.
* *pinus leiophylla*
** *lonchocarpus castilloi*
N/E: No especificado.

El contenido de esta tabla se representa en las Gráficas 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11.

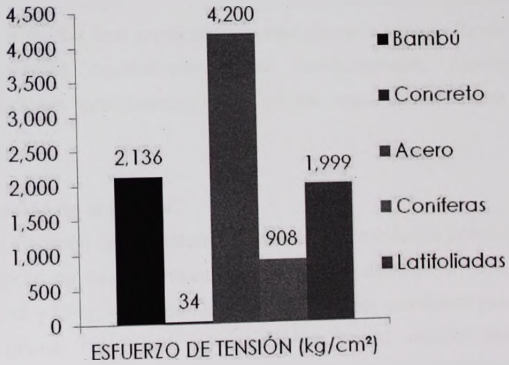
Gráfica 3.8 Comparativa de Compresión



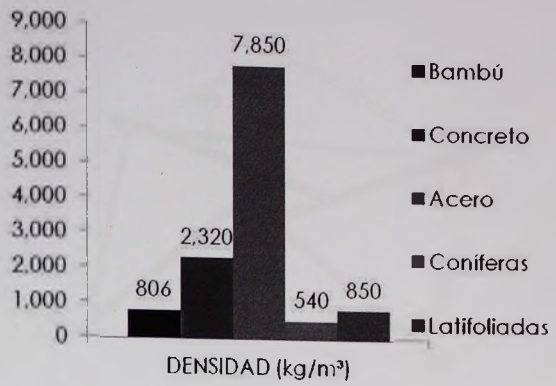
Gráfica 3.9 Comparativa de Flexión



Gráfica 3.10 Comparativa de Tensión



Gráfica 3.11 Comparativa de Densidad



3.1.2 Pruebas de carga a la estructura

En este apartado se presentan los resultados de las pruebas de carga a la estructura a través de los cuales se determinaron cuantitativamente las deformaciones presentadas en la estructura al aplicarse cargas puntuales entre 150 y 200kg en dos distintos puntos de ésta; de igual modo se obtuvo la rigidez final presentada en tres diversos puntos. Paralelamente se determinó cualitativamente su comportamiento estructural, y deformaciones permanentes, tanto en las vigas dobles, como en las uniones.

Descripción de la prueba

Para la medición de las deformaciones, fueron colocados potenciómetros electrónicos de desplazamiento en tres puntos distintos en la estructura (LP1, LP2 y LP3); los datos fueron registrados por computadora mediante el programa "MATLAB" de *MathWorks*™. Al mismo tiempo se determinaron dos puntos (W1 y W2) en donde aplicar las cargas puntuales

(Imágenes 3.5, 3.6 y 3.7). Las cargas aplicadas fueron determinadas en relación a la carrera máxima ofrecida por los potenciómetros, la cual fué de 50 mm (LP2 y LP3), y de 100 mm (LP1).

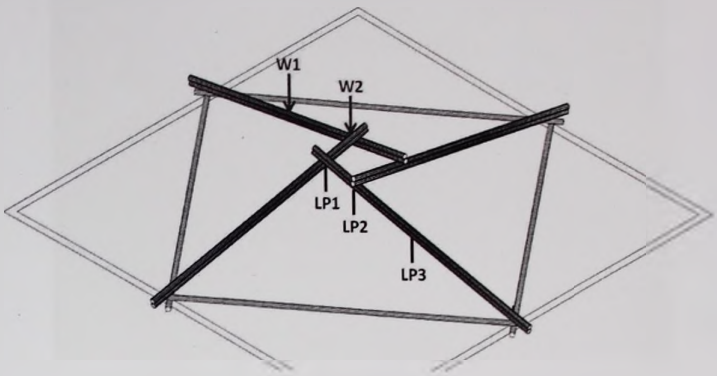


Imagen 3.5 Ubicación de los potenciómetros, y puntos de aplicación de las cargas

Dibujo: Carlos Uribe

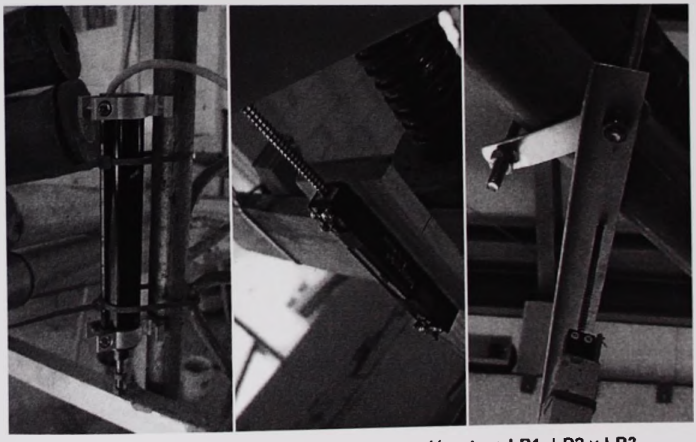


Imagen 3.6 De izquierda a derecha: potenciómetros LP1, LP2 y LP3

Fotografía: Carlos Uribe

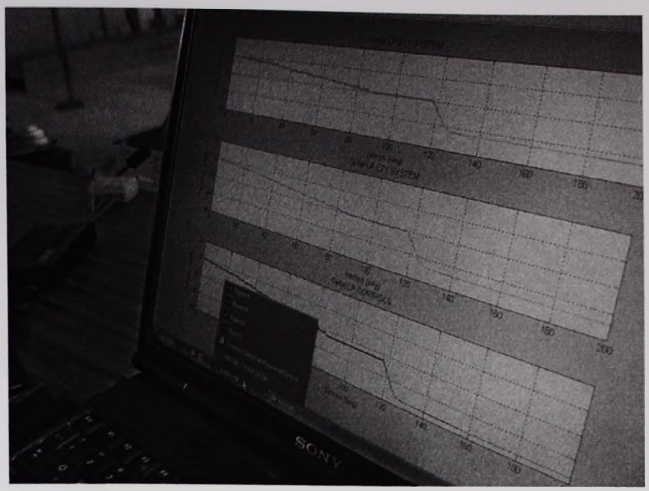


Imagen 3.7 Gráficas de los potenciómetros en el programa *Mat Lab*™

Fotografía: Carlos Uribe

Una vez colocados los potenciómetros, se procedió a aplicar paulatinamente las cargas puntuales, primero en el punto W1 y posteriormente en el punto W2. Estas cargas fueron "colgadas" en los puntos señalados, para lo cual fueron usados diversos elementos pesados previamente caracterizados (Imágenes 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11).

Las cargas máximas aplicadas en los puntos W1 y W2 fueron de 230.96kg y 185.42kg respectivamente.

Imagen 3.8 Carga aplicada en W1
Fotografía: Carlos Uribe

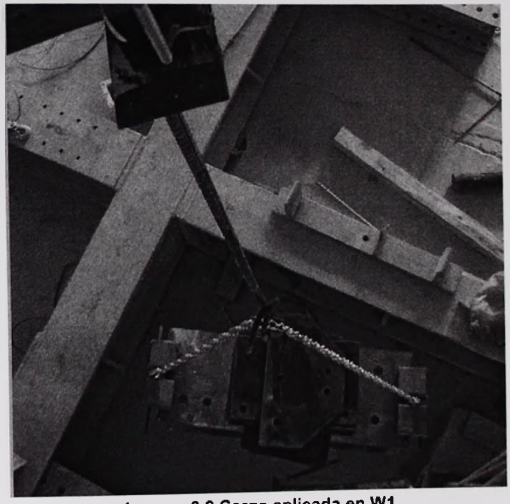


Imagen 3.9 Carga aplicada en W1
Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.10 Carga aplicada en W2
Fotografía: Carlos Uribe

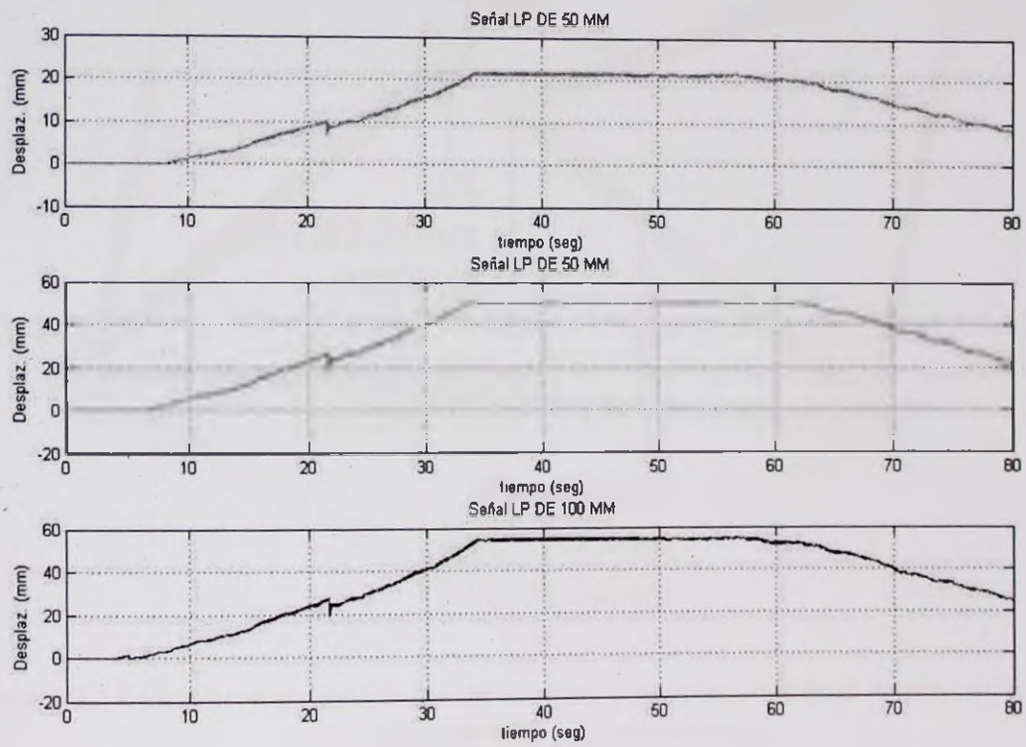


Imagen 3.11 Gráfica desplazamiento / tiempo proporcionada por el programa MATLAB.

Resultados

Debido a que los potenciómetros solamente graficaban el cociente entre deformación y tiempo (Imagen 3.11), para determinar la rigidez, se consideraron únicamente las cargas y desplazamientos finales en la graficación final.

La Imagen 3.12 muestra el esquema de aplicación de cargas y los desplazamientos finales de cada uno de los potenciómetros colocados, a partir del cual fueron obtenidas las gráficas que relacionan cargas y desplazamientos.

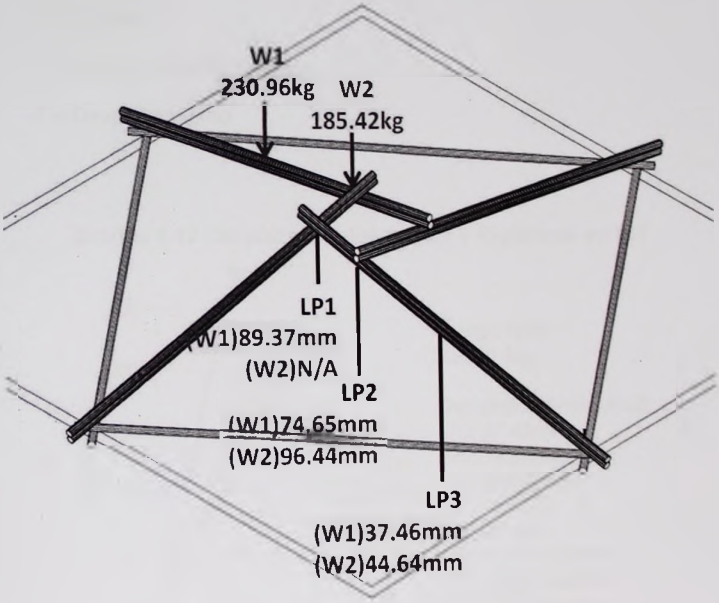


Imagen 3.12 Esquema de aplicación de cargas, y desplazamientos finales en cada potenciómetro. Dibujo: Carlos Uribe

Las gráficas 3.12 y 3.13 muestran los desplazamientos finales y rigideces presentados en la estructura al aplicar las cargas totales en los puntos W1 y W2.

Las rigideces fueron calculadas dividiendo la carga total, entre el desplazamiento observado en cada potenciómetro mediante la fórmula:

$$K = \frac{F}{\delta}$$

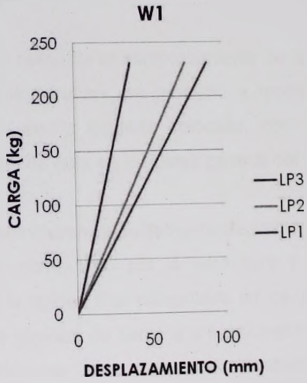
En donde:

K = Rigidez

F = Fuerza aplicada (carga)

δ = Desplazamiento

Gráfica 3.12 Desplazamientos finales y Rigideces en W1

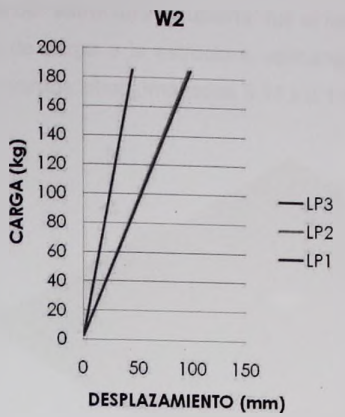


Carga total:
230.96 kg.

Desplazamiento final:
LP3: **37.46mm**
LP2: **74.65mm**
LP1: **89.37mm**

Rigideces:
LP3: **61.65 kg/cm**
LP2: **30.94 kg/cm**
LP1: **25.84 kg/cm**

Gráfica 3.13 Desplazamientos finales y Rigideces en W2



Carga total:
185.42 kg.

Desplazamiento Final:
LP3: **44.64mm**
LP2: **96.44mm**
LP1: **N/A**

Rigideces:
LP3: **41.54 kg/cm**
LP2: **19.23 kg/cm**
LP1: **N/A**

3.1.3 Pruebas de carga al Sistema de techumbre (estructura + cubierta)

Una vez obtenido el comportamiento de la estructura así como su rigidez en distintos puntos, se procedió a repetir el experimento pero en esta ocasión con la cubierta colocada, con lo que se logró determinar la influencia de ésta en la rigidez general del sistema (estructura + cubierta).

Se determinaron cuantitativamente las deformaciones presentadas en el sistema compuesto por la estructura y la cubierta; posteriormente se obtuvo la rigidez final presentada en los tres mismos puntos de la prueba anterior (prueba de carga a la estructura) y se compararon los resultados. Paralelamente se determinó cualitativamente su comportamiento estructural, y deformaciones en sus elementos (vigas dobles, paneles y uniones).

Descripción de la prueba

El procedimiento para la medición de las deformaciones presentadas en el sistema de "estructura + cubierta" fue el mismo que el llevado a cabo en la prueba de carga a la estructura, aplicando las mismas cargas puntuales en los mismos sitios (Imágenes 3.13 y 3.14).

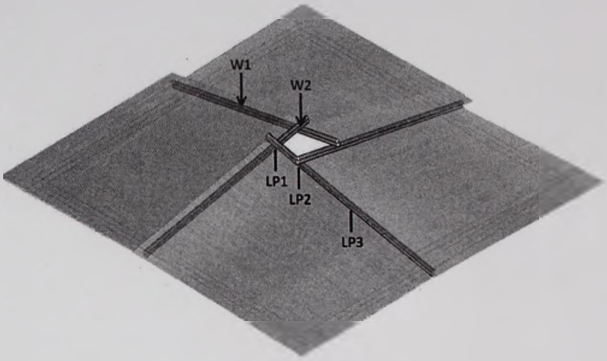


Imagen 3.13 Ubicación de los potenciómetros, y puntos de aplicación de las cargas. Dibujo: Carlos Uribe

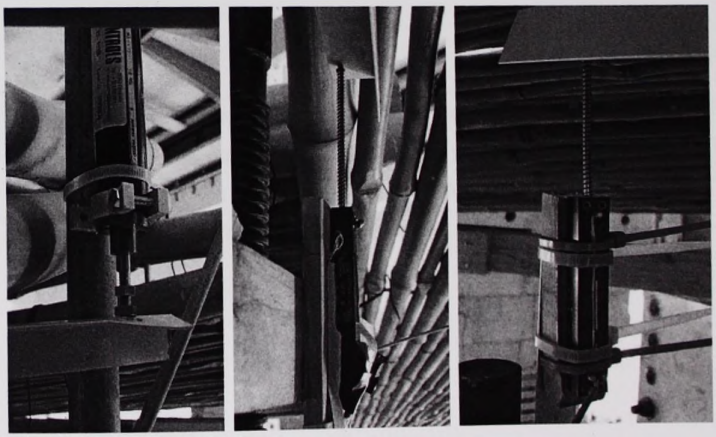


Imagen 3.14 De izquierda a derecha: potenciómetros LP1, LP2 y LP3

Fotografía: Carlos Uribe

Las cargas máximas aplicadas en los puntos W1 y W2 fueron de 230.34kg y 185.31 kg respectivamente, es decir, casi idénticas a las aplicadas en la prueba de carga de la estructura sin cubierta (Imagen 3.15).

Imagen 3.15 Cargas preliminares aplicadas en W1 y W2
Fotografía: Carlos Uribe

Resultados

La Imagen 3.16 muestra el esquema de aplicación de cargas en el sistema conformado por la estructura y la cubierta, y los desplazamientos finales de cada uno de los potenciómetros colocados a partir del cual fueron obtenidas las gráficas que relacionan cargas y desplazamientos.

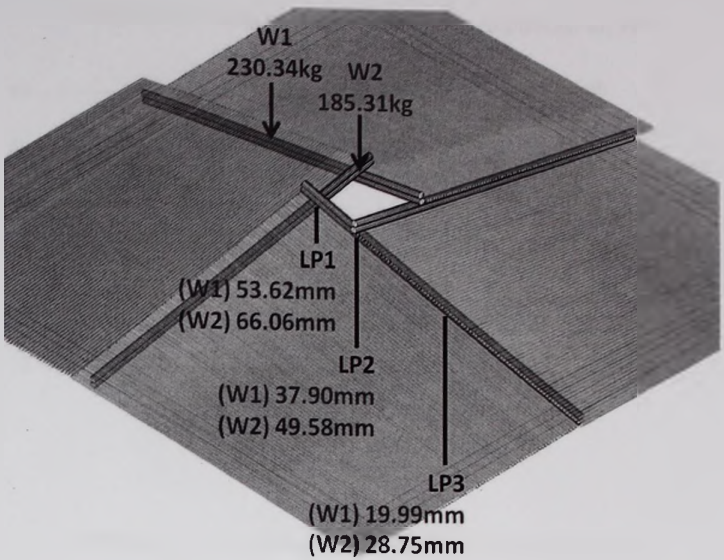
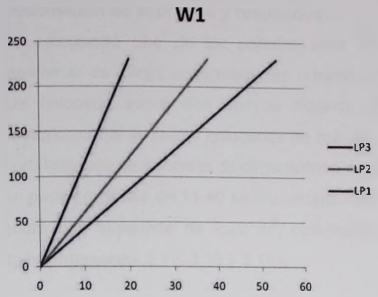


Imagen 3.16 Esquema de aplicación de cargas, y desplazamientos finales en cada potenciómetro (estructura + cubierta). Dibujo: Carlos Uribe

Las gráficas 3.14 y 3.15 muestran los desplazamientos finales y rigideces presentados en la estructura (con la cubierta colocada) al aplicar las cargas totales en los puntos W1 y W2.

La fórmula empleada para el cálculo de las rigideces fue la misma empleada en la prueba de carga de la estructura.

Gráfica 3.14 Desplazamientos finales y Rigideces en W1

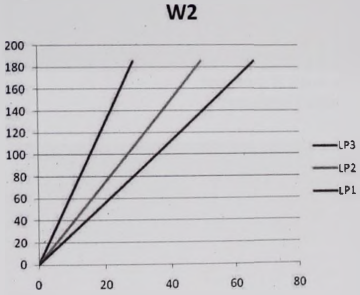


Carga total:
230.34 kg.

Desplazamiento Final:
LP3: **19.99 mm**
LP2: **37.9.65 mm**
LP1: **53.62 mm**

Rigideces:
LP3: **115.23 kg/cm**
LP2: **60.67 kg/cm**
LP1: **42.95 kg/cm**

Gráfica 3.15 Desplazamientos finales y Rigideces en W2



Carga total:
185.31 kg.

Desplazamiento Final:
LP3: **28.75 mm**
LP2: **49.58 mm**
LP1: **66.06 mm**

Rigideces:
LP3: **64.46 kg/cm**
LP2: **37.38 kg/cm**
LP1: **28.05 kg/cm**

3.1.4 Prueba de carga a un Panel tipo

Descripción de la prueba y resultados

Se seleccionó uno de los paneles para ser sometido a una prueba preliminar de carga uniformemente repartida. Para este efecto, el panel fue colocado sobre dos apoyos dejando un claro libre de 2.20 m; posteriormente le fueron colocados de manera uniforme cuarenta bloques prefabricados de concreto de dimensiones nominales 15 x 20 x 40 cm, con un peso promedio de 11.40 kg c/u, alcanzando un peso total de 455.04 kg sobre una superficie de 2.20 m^2, obteniendo así una carga de 206.83 kg/m^2 (Imágenes 3.17, 3.18 y 3.19).

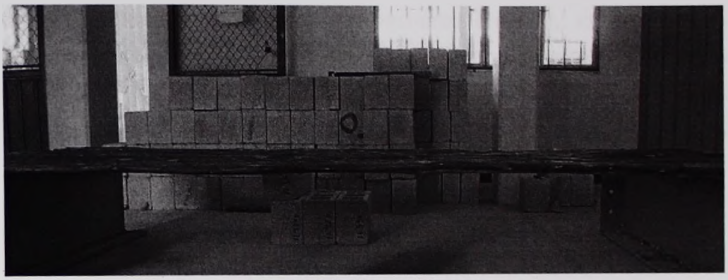


Imagen 3.17 Panel sin carga
Fotografía: Carlos Uribe

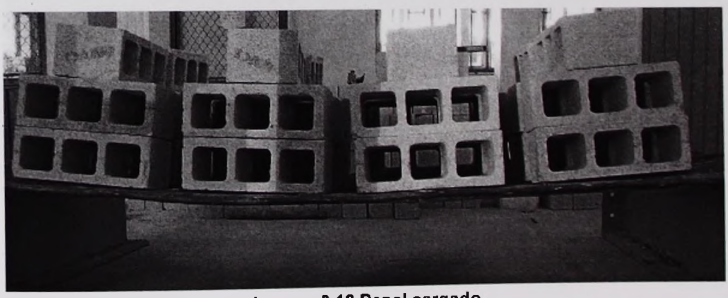


Imagen 3.18 Panel cargado
Fotografía: Carlos Uribe

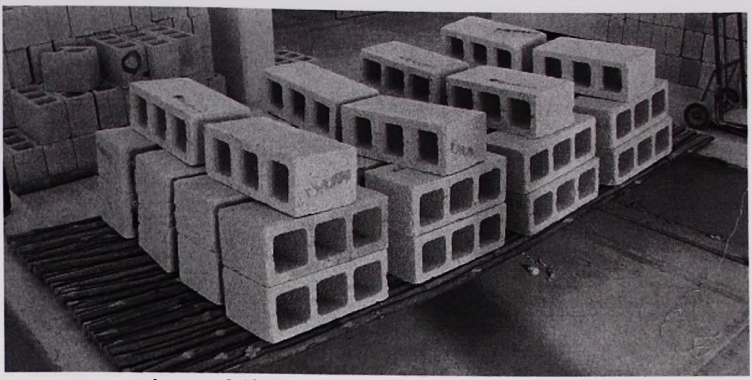


Imagen 3.19 Panel cargado. Fotografía: Carlos Uribe

Una vez cargado el panel, fueron registradas las flechas a cada lado, esto debido a que, por tratarse de un elemento irregular, los valores no necesariamente serían los mismos. Los valores obtenidos fueron de 60mm y 80 mm de flecha. La carga se dejó colocada por un periodo de 24hrs a fin de determinar si el panel se flexionaría aún más durante este periodo de tiempo; los valores de las flechas tomados posteriormente fueron de 68 mm y 87 mm respectivamente, promediando así una deformación post-carga de 7 mm (Imagen 3.20).

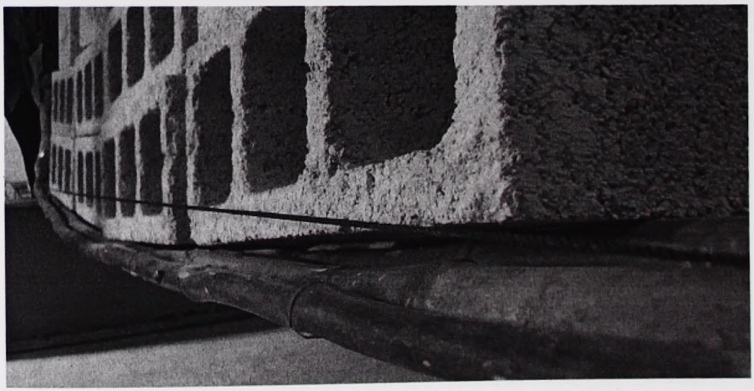


Imagen 3.20 Determinación de las flechas. Fotografía: Carlos Uribe

Finalmente el panel fue descargado, y fueron medidas las flechas a fin de determinar si tuvo deformaciones permanentes significativas; al respecto, no presentaron dichas deformaciones, aunque cabe mencionar que, por tratarse de un elemento irregular, los nudos y entrenudos presentan siempre variaciones de horizontalidad.

3.1.5 Prueba de comportamiento aerodinámico

A través de una maqueta a escala, se logró determinar, cualitativamente, el comportamiento aerodinámico de la geometría de la techumbre ante diversos flujos de viento; de igual modo se verificaron las zonas de mayor presión frente a las ráfagas de viento.

Descripción de la prueba

1. Se elaboró un modelo a escala 1:10 emulando el material a emplear en la estructura y la cubierta, con varillas de madera de Ø5 mm, así como los muros "tipo" de soporte, hechos con *triplay* de 12 mm (Imagen 3.21).

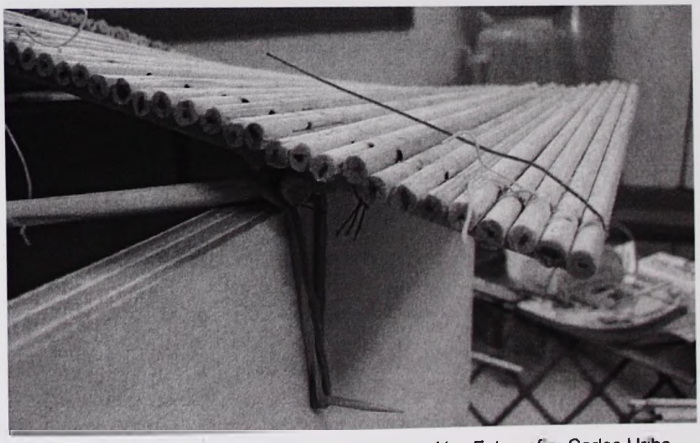


Imagen 3.21 Maqueta en proceso de elaboración. Fotografía: Carlos Uribe

2. El modelo se introdujo al túnel de viento de la FIUADY, en el cual se le aplicaron vientos de entre 5 m/s y 20 m/s (18 km/h y 72 km/h respectivamente), (Imágenes 3.22 y 3.23).

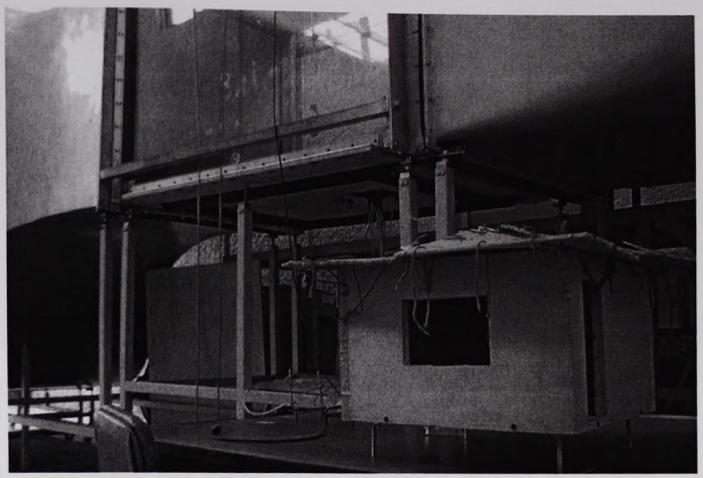


Imagen 3.22 Maqueta antes de ser introducida al túnel de viento de la Faculta de Ingeniería de la UADY. Fotografía: Carlos Uribe

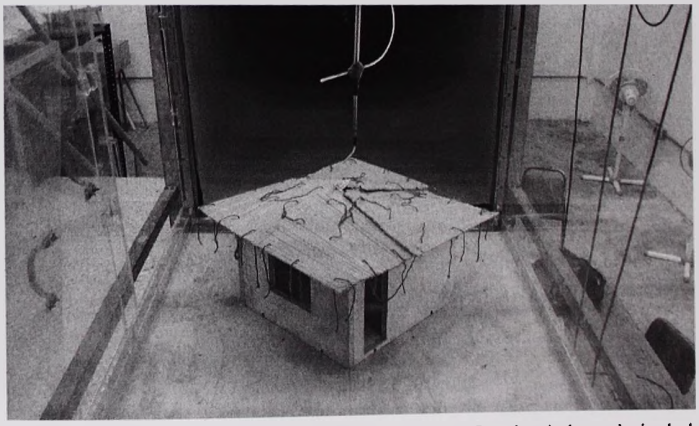


Imagen 3.23 Maqueta dentro del túnel de viento de la Faculta de Ingenieria de la UADY. Fotografía: Carlos Uribe

3. Se empleó una máquina de humo "Fire Beetle" Mod. W-600 para poder observar el comportamiento aerodinámico del modelo (Imagen 3.24).

Imagen 3.24 Máquina de humo Mod. W-600
Fotografía: Carlos Uribe

4. El experimento fue registrado a través de fotografías y video, para posteriormente poder analizar las imágenes obtenidas y determinar así el comportamiento aerodinámico observado (Imagen 3.25).

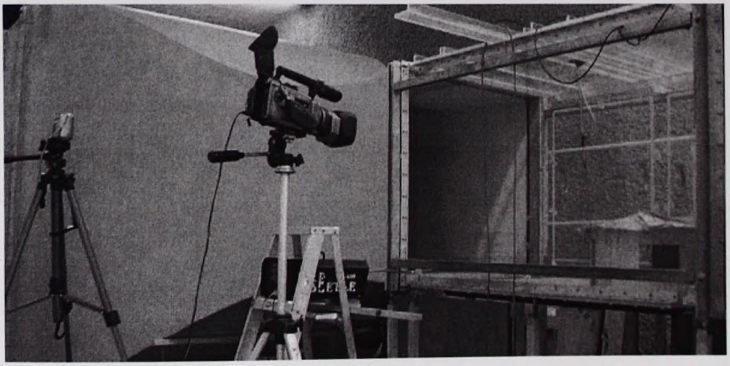


Imagen 3.25 Registro video-fotográfico de la prueba de comportamiento aerodinámico. Fotografía: Carlos Uribe

A continuación se presentan imágenes de la maqueta dentro del túnel de pruebas, aplicando velocidades de viento de 5, 10,15 y 20 m/s (18, 36, 54 y 72 km/h respectivamente), (Imágenes 3.26, 3.27, 3.28 y 3.29) en las cuales se puede observar el comportamiento aerodinámico a través de los flujos descritos por el humo aplicado. Es importante saber que, aunque la escala de la maqueta empleada es 1 a 10, la velocidad teórica del viento sobre un modelo a escala real no tiene necesariamente el mismo factor escalar, pues éste depende de diversos factores que, para efectos cualitativos del estudio no fueron considerados. En este sentido, se tomará un factor escalar de 5, con la finalidad de tener un acercamiento conceptual del comportamiento aerodinámico del sistema en un modelo a escala 1 a 1; así, las velocidades aplicadas sobre un modelo a escala real resultarían ser de 25, 50, 75 y 100 m/s (90, 180, 270 y 360 km/h respectivamente).

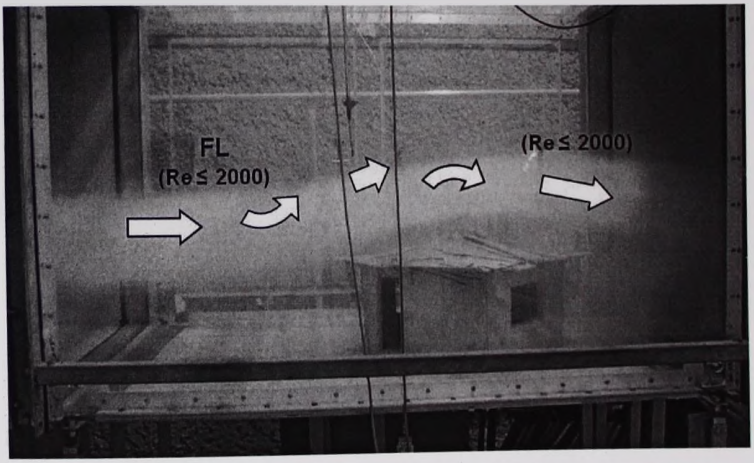


Imagen 3.26 Velocidad = 5 m/s (18 km/h). Equivalente a escala 1:1 = 90 km/h
Fotografía: Carlos Uribe

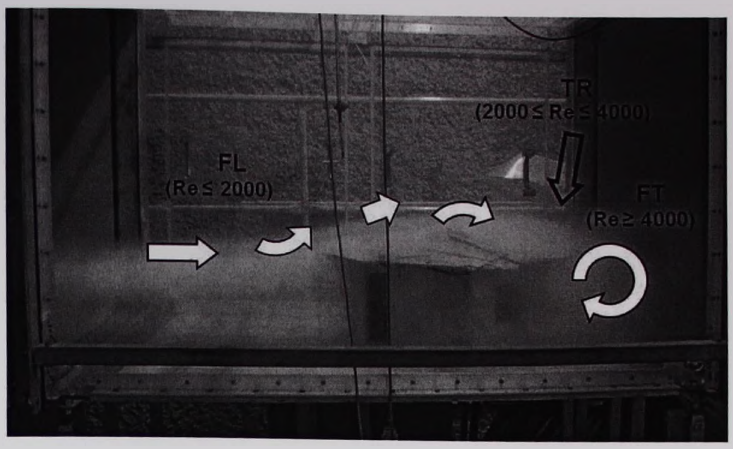


Imagen 3.27 Velocidad = 10 m/s (36 km/h). Equivalente a escala 1:1 = 180 km/h
Fotografía: Carlos Uribe

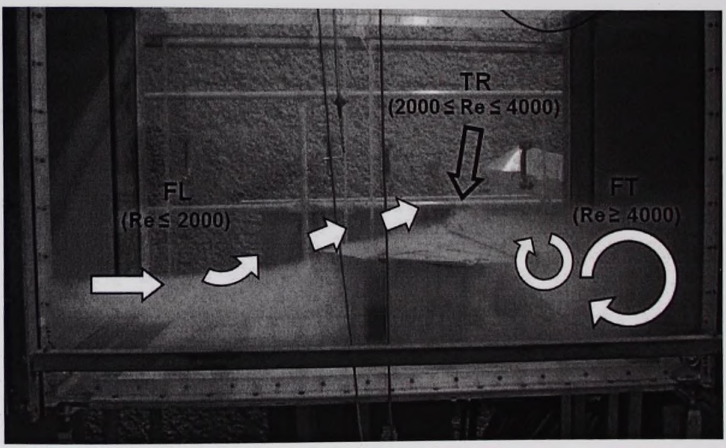


Imagen 3.28 Velocidad = 15 m/s (54 km/h). Equivalente a escala 1:1 = 270 km/h
Fotografía: Carlos Uribe

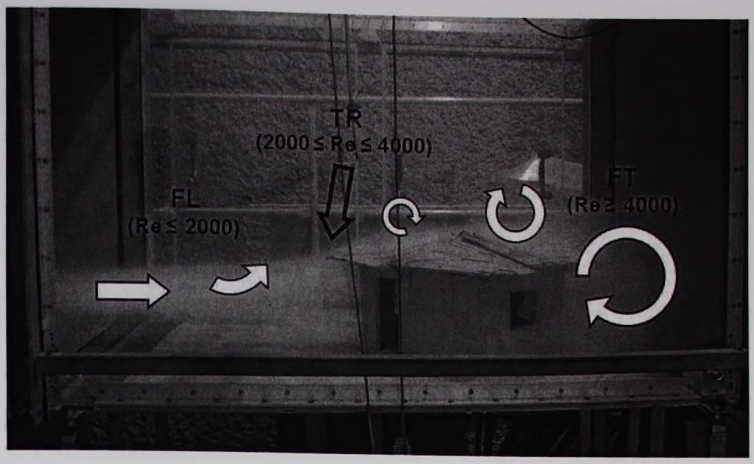


Imagen 3.29 Velocidad = 20 m/s (72 km/h). Equivalente a escala 1:1 = 360 km/h
Fotografía: Carlos Uribe

Dado que el objetivo de la prueba fue observar y determinar de modo cualitativo el comportamiento aerodinámico general del modelo, éste fue colocado en una posición a 45° respecto al flujo del aire, considerando que no habría variaciones significativas al realizar la misma prueba en otras posiciones, sin embargo para estudios más detallados, cabría realizar pruebas en todas las posiciones posibles en que el viento pudiera incidir sobre el elemento.

Resultados

Como puede observarse, mientras menor sea la velocidad del viento, el flujo permanece laminar sobre un porcentaje mayor de la superficie de la cubierta, o "capa límite". En este caso, a una velocidad teórica a escala real de 25 m/s (90 km/h) el flujo del viento permanece laminar a lo largo de toda la superficie, en este sentido, considerando al Número de Reynolds (NR) como el cociente entre la convección y la velocidad del fluido, el cual indica el carácter laminar o turbulento de este, se infiere un NR menor que 2000.

A velocidades mayores puede observarse que la frontera entre el flujo laminar (NR ≤ 2000) y el flujo turbulento (NR ≥ 4000) se va acercando cada vez más al punto de contacto con la superficie (Imágenes 3.27 y 3.28, velocidades reales de 180 y 270 km/h respectivamente), hasta el punto en que el flujo se vuelve turbulento desde el primer contacto con la superficie (Imagen 3.29, velocidad real de 360 kph). Es importante considerar que los flujos turbulentos generan vórtices sobre las superficies que pudieran tender a ejercer fuerzas de succión, por lo que mientras mayor sea la superficie sometida a un flujo turbulento, mayor será el riesgo de sufrir una falla en la cubierta.

Esta prueba nos da una idea escalada del comportamiento geométrico de la techumbre, la cual en su dimensión real sufriría embates de vientos desde 90, hasta 360 km/h.

3.2 PRUEBA DE CONSTRUCTIBILIDAD

Como parte de los objetivos de la investigación, se planteó la construcción de un modelo prototipo a escala real el cual pudiera ser sometido a pruebas mecánicas, y así determinar su resistencia ante diversas magnitudes de carga. Por otro lado, el proceso de construcción del modelo permitiría, a través de la experiencia, determinar su autoconstructibilidad, en relación, a los procesos constructivos, al uso de herramientas, y al transporte y montaje del sistema. En este sentido, se describe a continuación el proceso de construcción y montaje del sistema dividido en dos elementos principales: estructura y cubierta, posteriormente complementado con conclusiones con las cuales se determinará, de modo cualitativo, la autoconstructubilidad, del sistema de techumbre, es decir, su posibilidad de ser auto construido.

3.2.1 Elaboración de la estructura

En esta primera etapa, se presenta la elaboración de la estructura, la cual dio la pauta tanto para la colocación de la cubierta, como para posteriores análisis que permitan su perfeccionamiento, ya sea a nivel de diseño, o a nivel técnico constructivo.

Gracias a este proceso, se logró determinar de modo cualitativo la autoconstructubulidad de la estructura; dicho proceso a su vez permitiría identificar y/o establecer opciones en el proceso de construcción y descubrir diversas problemáticas apreciables solamente a través de la experimentación. Como resultado de este proceso, se obtuvo un objeto que pudo ser posteriormente sometido a las pruebas mecánicas anteriormente descritas, a través de las cuales se verificó su resistencia mecánica.

Descripción constructiva del prototipo

A partir del sistema de "barras de madera" desarrollado por el Arq. Francisco Montero, y una vez determinada un área a cubrir de 4.00 x 4.00m, se procede a la fabricación de la estructura, tomando como referencia inicial los planos previamente elaborados, en los que se indican las dimensiones y la ubicación de los puntos de unión entre las piezas.

Debido al alto costo que representaría elaborar un módulo "tipo" de vivienda completo, se optó por emular el perímetro de apoyo por medio de un marco de polines de madera de pino de 3" x 3" (Imágenes 3.30 y 3.31).

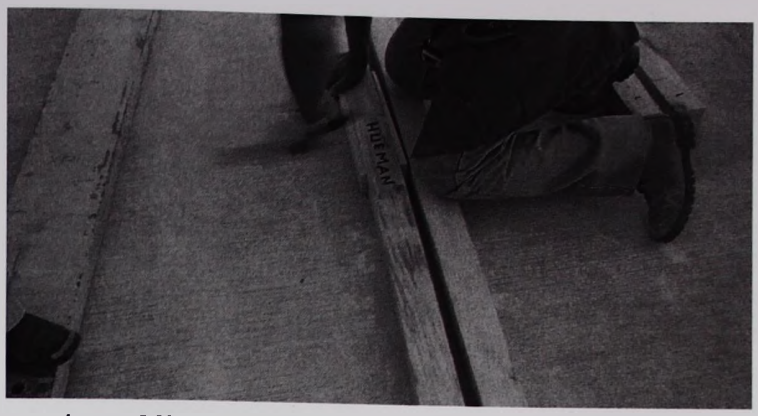


Imagen 3.30 Elaboración del marco de soporte. Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.31 Marco de soporte terminado. Fotografía: Carlos Uribe

Posteriormente se procedió a fabricar el "soporte base", hecho con cuatro cañas de bambú de Ø4.5 cm con 3.00 m de longitud (Imagen 3.32), el cual fue colocado sobre el marco de polines de madera siguiendo un plano guía (Imagen 3.33). Las perforaciones fueron realizadas con una broca para madera de Ø3/8", y las uniones se hicieron a base de varillas

roscadas o "espárragos" de Ø5/16", con sus respectivas rondanas y tuercas (Imágenes 3.34 y 3.35).

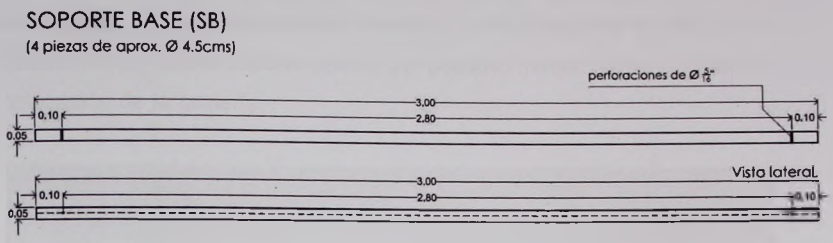


Imagen 3.32 Piezas del soporte base Dibujo: Carlos Uribe

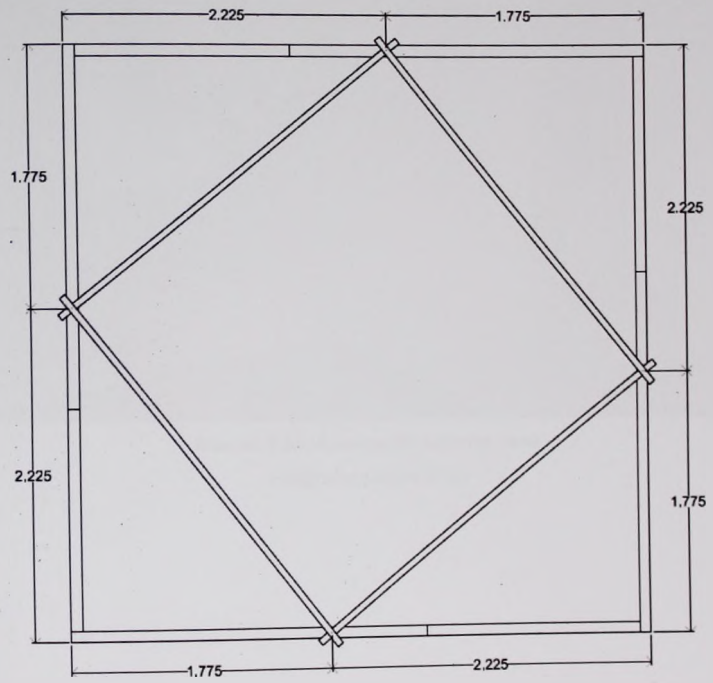


Imagen 3.33 Colocación del soporte base encima del marco de polines

Dibujo: Carlos Uribe

La función de este soporte es servir como guía para la colocación de los siguientes elementos de bambú (vigas dobles), así como para mantener escuadrado al sistema en general; otra de sus funciones es permitir el armado del sistema base a nivel de suelo y posteriormente elevarlo a su posición final. Dicho soporte puede ser posteriormente removido para la colocación de la cubierta.

Imagen 3.34 Uniones del soporte base

Fotografía: Carlos Uribe

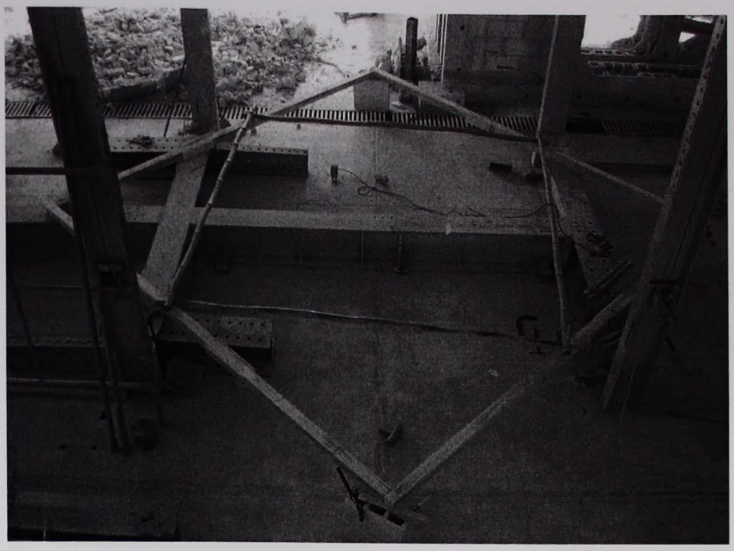


Imagen 3.35 Soporte base terminado

Fotografía: Carlos Uribe

Finalmente se procedió a la fabricación de las "vigas dobles" a base de cañas de Ø4.5cm y 2.50 m de longitud (Imagen 3.36). Debido a que las perforaciones de las piezas requerían un ángulo determinado, se requirió colocar cada pieza sobre un soporte de modo que se pudiera obtener la pendiente deseada, y de este modo hacer las perforaciones perpendiculares al piso (Imágenes 3.37 y 3.38).

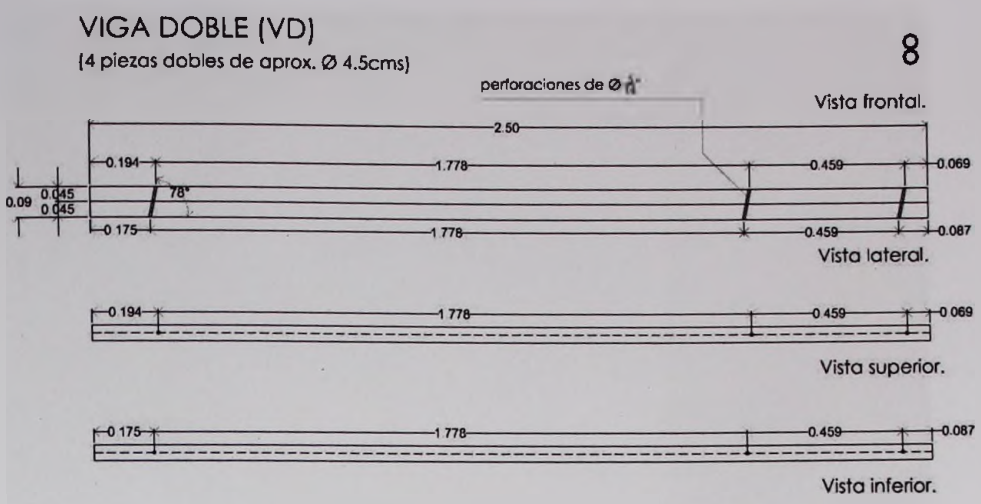


Imagen 3.36 Piezas de la viga doble

Dibujo: Carlos Uribe

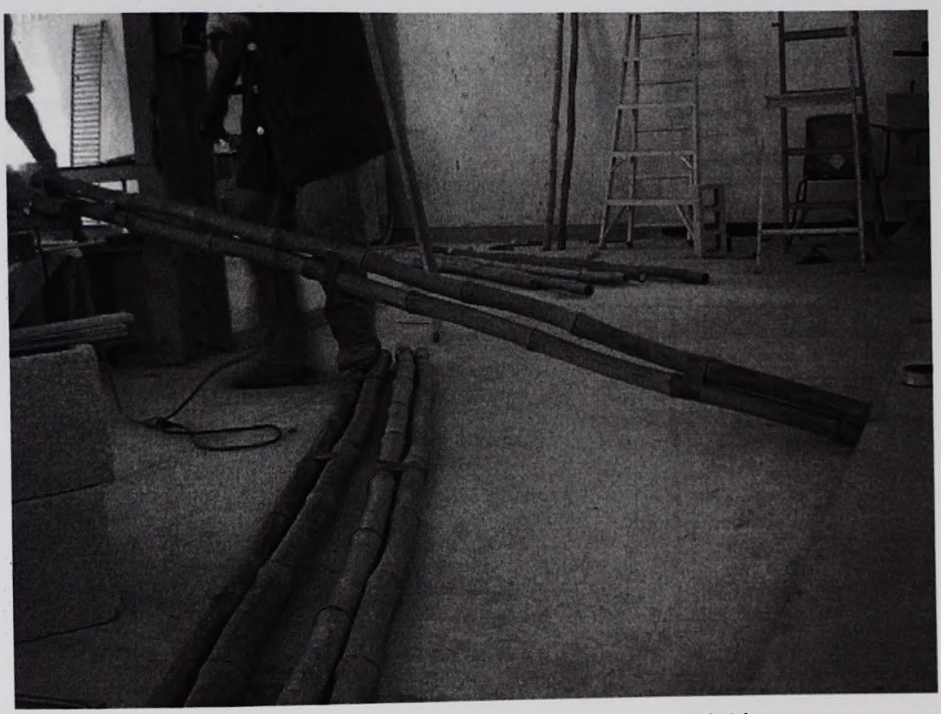


Imagen 3.37 Apoyo con pendiente para la viga doble

Fotografía: Carlos Uribe

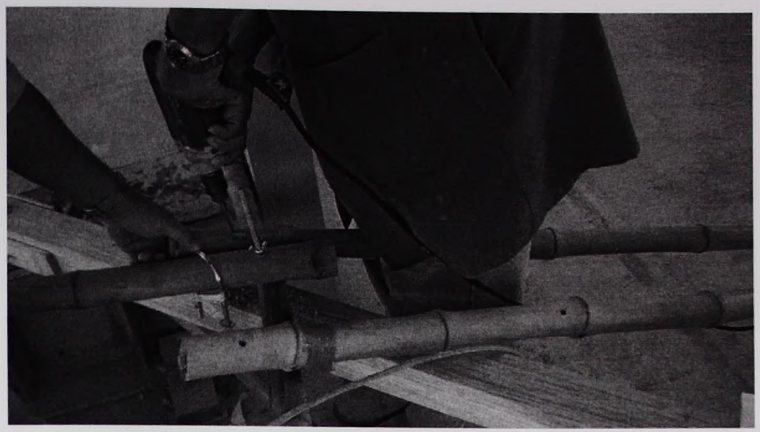


Imagen 3.38 Perforación con ángulo (viga doble)
Fotografía: Carlos Uribe

Las perforaciones en las vigas dobles fueron realizadas con una broca para madera de Ø3/8 al igual que las piezas del "soporte base"; las piezas fueron sujetas entre sí por medio de piezas de 25 cm de varilla roscada de acero de Ø5/16", con sus respectivas tuercas y rondanas (Imágenes 3.39, 3.40 y 3.41).

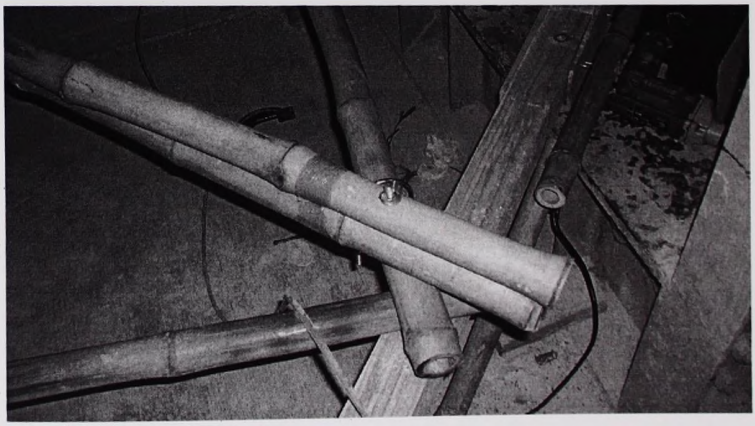


Imagen 3.39 Viga doble (unión con el soporte base). Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.40 Unión de las vigas dobles en la cumbrera

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.41 Estructura terminada

Fotografía: Carlos Uribe

Parte del proceso incluyó registrar el peso de cada elemento para poder determinar el peso total de la estructura, el cual fue de 28.63 kg (Imágenes 3.42 y 3.43), lo cual la hace de fácil manejo para su colocación. (Imágenes 3.44 y 3.45).

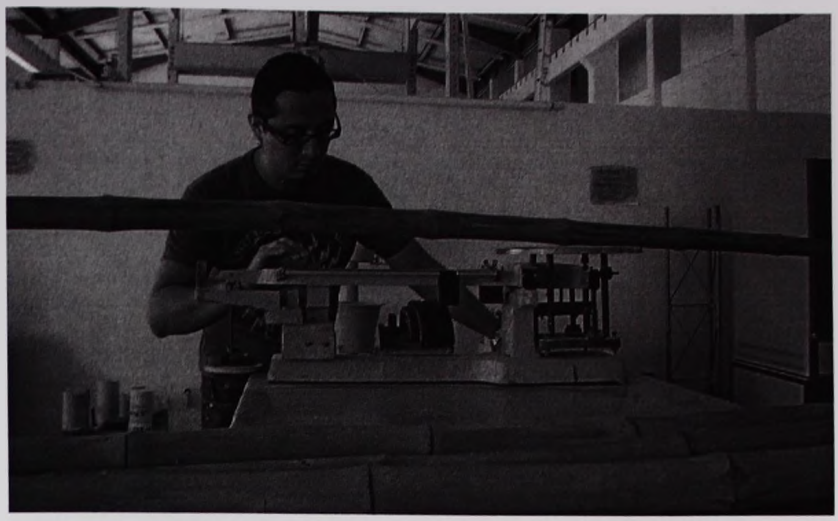


Imagen 3.42 Registro del peso de cada elemento de la estructura

Fotografía: Carlos Uribe

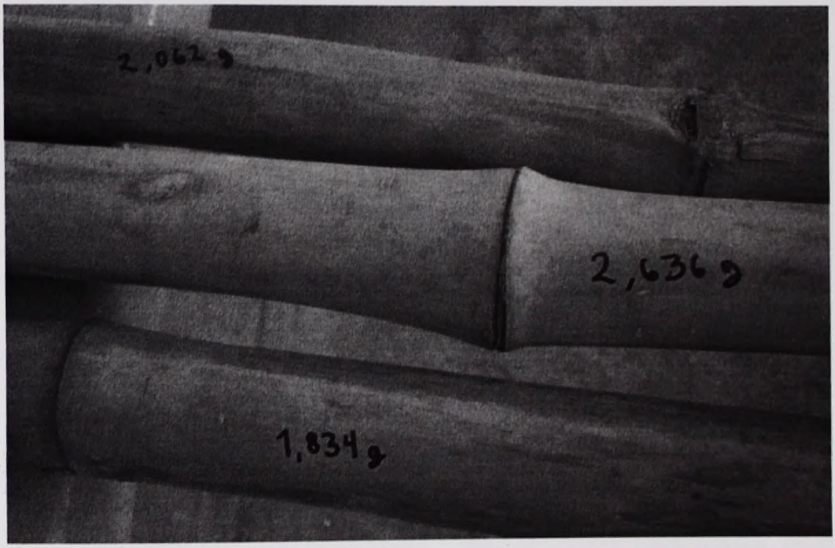


Imagen 3.43 Registro del peso de cada elemento de la estructura

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.44 Estructura cargada por una sola persona

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.45 Elevación y colocación de la estructura

Fotografía: Carlos Uribe

Resultados

Al finalizar el proceso constructivo – experimental de la estructura, se pudieron observar los siguientes hechos:

- La construcción y manejo pudo ser llevada a cabo por dos o tres personas en un tiempo relativamente corto. En este sentido puede inferirse que mientras más experiencia se vaya adquiriendo en la fabricación, los tiempos serán cada vez menores, sobre todo si se estandariza el proceso y/o se lleva a cabo su producción en serie.

- Se emplearon herramientas simples en todo el proceso, lo cual representa una ventaja en relación a su disponibilidad, pues son relativamente fáciles de conseguir y su uso no requiere de ningún tipo de conocimientos especializados. Estas herramientas fueron básicamente: taladro, segueta, cordel y elementos de apoyo.

- Los elementos de unión tampoco requirieron materiales o piezas especializadas; en resumen se emplearon 2 m de varilla roscada de acero de Ø5/16" (la cual fue cortada con segueta según se fuera requiriendo), 8 tuercas de acero de Ø5/16", 8 mariposas de acero de Ø5/16" y 18 rondanas de acero de Ø5/16".

- La ligereza de la estructura facilitó su manejo y colocación sobre el módulo tipo entre dos personas solamente.

3.2.2 Colocación de la cubierta

En esta segunda etapa, se presenta el proceso de colocación de la cubierta conformada por paneles prefabricados de bambú. Gracias a esta experiencia fue posible determinar de modo cualitativo su manejo y

montaje, e identificar diversas problemáticas y alternativas de montaje o sustitución de elementos.

Caracterización y disposición de los paneles

Los paneles empleados fueron prefabricados en la Hacienda Xixim. Se contó con diez paneles, cuyas dimensiones nominales fueron de 1 m de ancho por 2.50 m de largo, hechos con un número promedio de 38 cañas de diámetros variables de entre Ø15 mm y Ø30 mm, dispuestas en el sentido largo, sujetas entre sí por medio de alambrón de acero de Ø5 mm, colocado en cinco puntos a lo largo, atravesando cada una de las cañas, y con dobleces en los extremos. El peso promedio de los paneles fue de 28.02 kg (Imágenes 3.46 y 3.47).

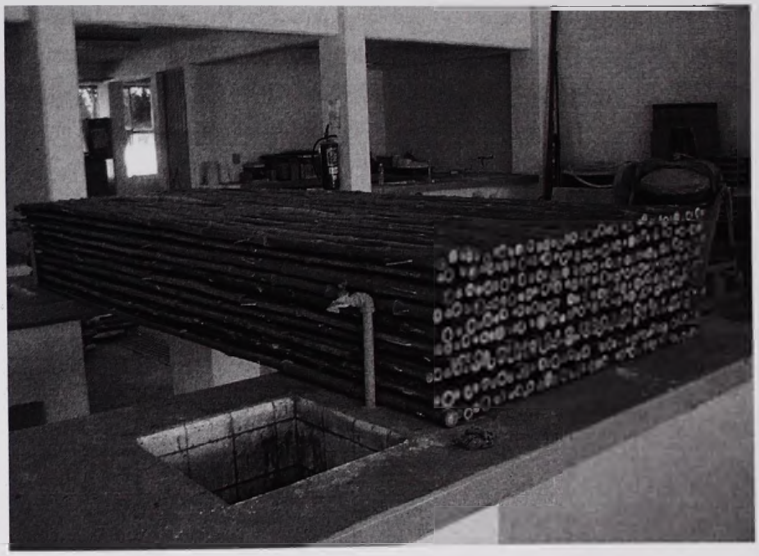


Imagen 3.46 Paneles de bambú estibados Fotografía: Carlos Uribe

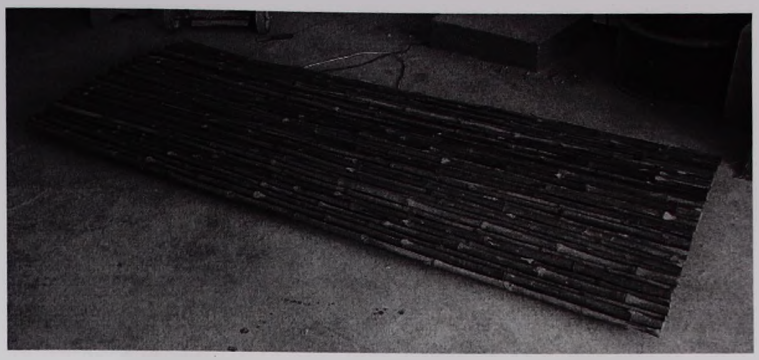


Imagen 3.47 Panel tipo Fotografia: Carlos Uribe

Los paneles fueron dispuestos por parejas en cada uno de los cuadrantes formados por la estructura, apoyándose un extremo sobre la estructura de bambú, y el otro sobre el marco de polines de madera, el cual representó los muros del módulo tipo descrito con anterioridad (Imágenes 3.48 y 3.49).

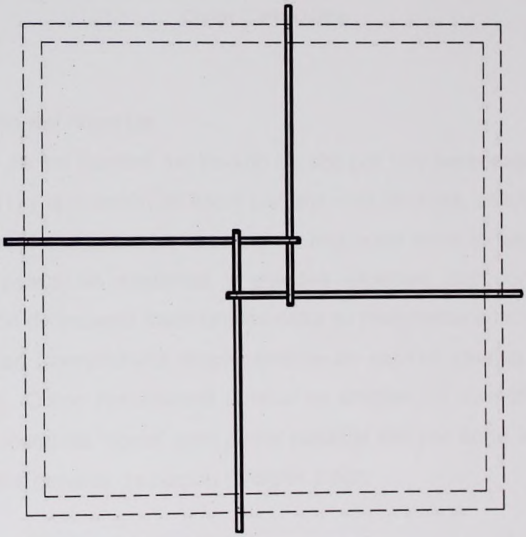


Imagen 3.48 Cuadrantes conformados por la estructura
Dibujo: Carlos Uribe

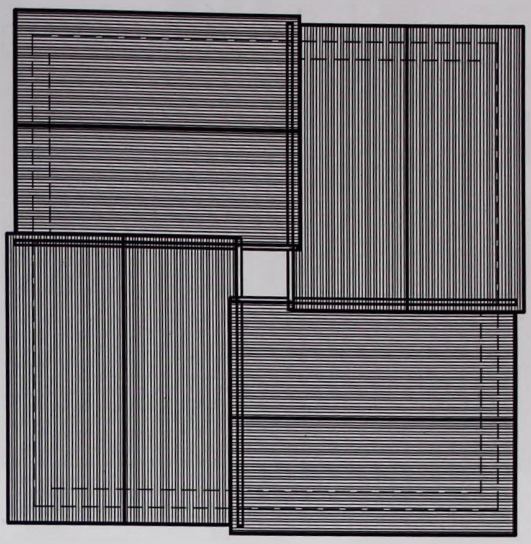


Imagen 3.49 Disposición de los paneles sobre la estructura
Dibujo: Carlos Uribe

Descripción del montaje

El montaje de los paneles fue llevado a cabo por tres personas (Imágenes 3.50 y 3.51), y la sujeción de éstos por una sola persona, empleando para ello un cordel alquitranado, usualmente requerido para la fabricación de redes de pesca de medianas y grandes especies, así como para la construcción de palapas tradicionales dada su resistencia a la intemperie y su tenacidad (comprobada empíricamente en valores iguales o mayores que 20 kg). Como herramienta auxiliar se empleó un alambre recocido, doblado a modo de "aguja" para poder pasar el hilo por entre los espacios vacíos de los paneles de bambú (Imagen 3.52).

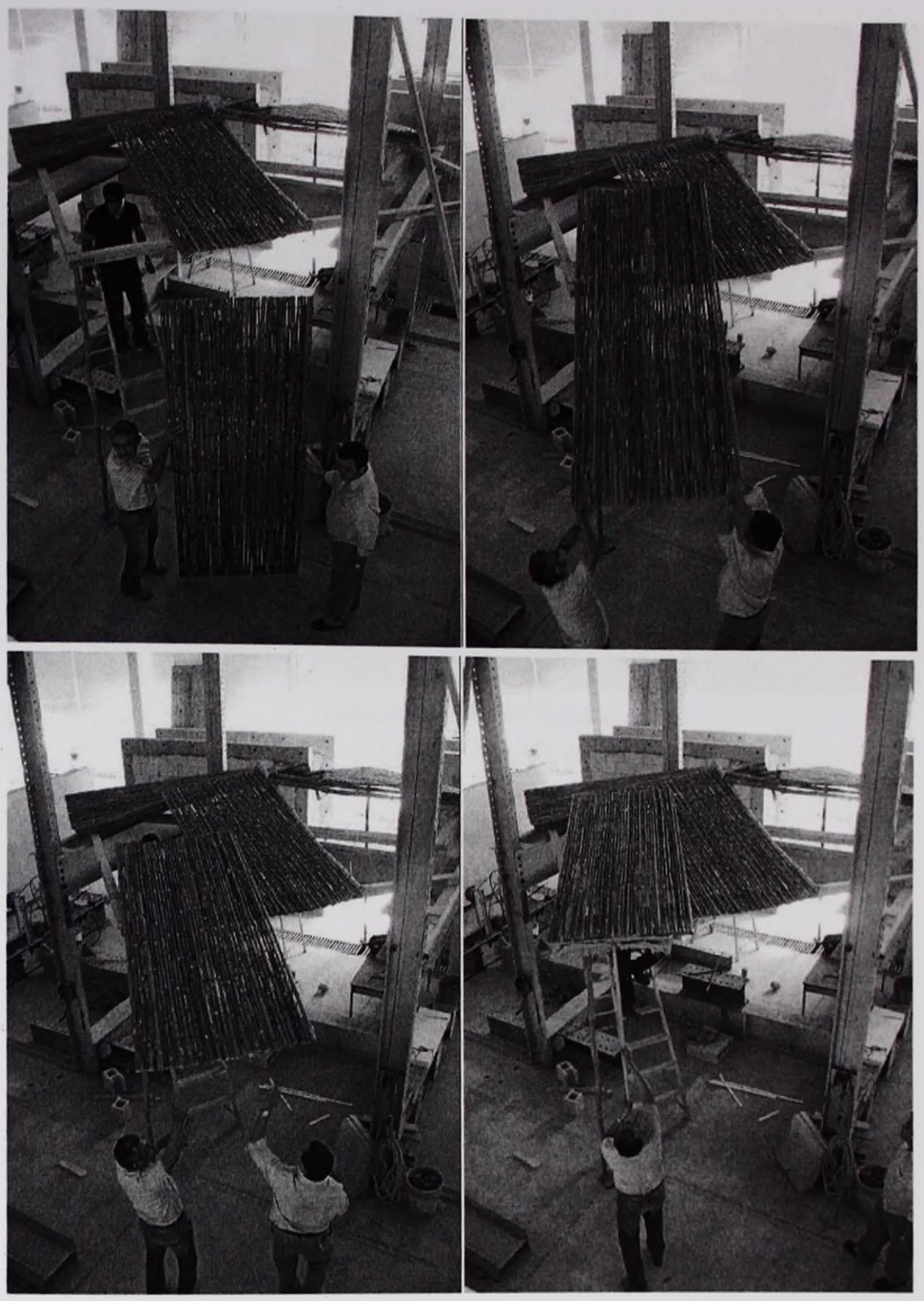


Imagen 3.50 Proceso de colocación de los paneles
Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.51 Panel montado

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.52 Proceso de sujeción por medio de amarres simples

Fotografía: Carlos Uribe

Los paneles fueron asegurados a la estructura y entre ellos en cinco puntos por cada lado, con amarres triples cada uno (Imágenes 3.53 y 3.54).

Al mismo tiempo, durante la sujeción de los elementos, pudo experimentarse preliminarmente la resistencia del sistema completo al situarse de una a dos personas encima de los paneles montados y asegurados (Imagen 3.55).

Imagen 3.53 Sujeción de los paneles a la estructura. Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.54 Sujeción de los paneles a la estructura. Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.55 Prueba preliminar de soporte. Fotografía: Carlos Uribe

Resultados

La geometría general obtenida por la cubierta fue de cuatro paraboloides hiperbólicos sobre los cuadrantes conformados por la estructura, con doble pendiente cada uno (Imágenes 3.56 y 3.57), quedando al centro un respiradero cuadrado de aproximadamente 40 x 40 cm el cual fue cubierto con una cumbrera cuadrada de 80 x 80 cm obtenida de un panel recortado, sujeta con dos cañas de soporte (Imágenes 3.58 a 3.63).

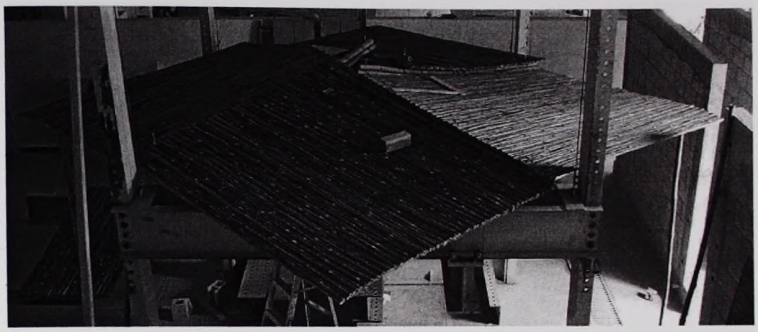


Imagen 3.56 Aspecto general del sistema de techumbre Fotografía: Carlos Uribe

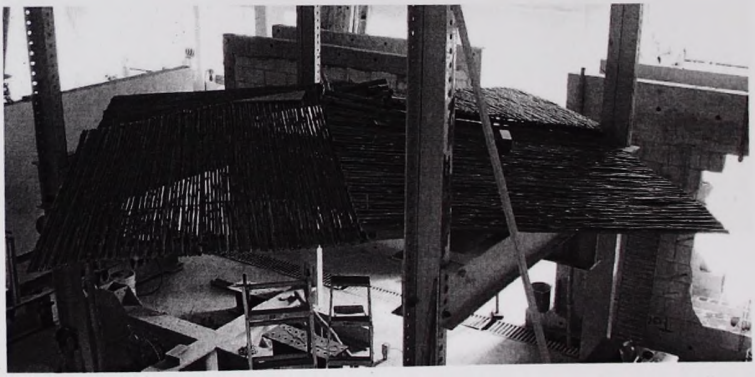


Imagen 3.57 Aspecto general del sistema de techumbre. Fotografía: Carlos Uribe

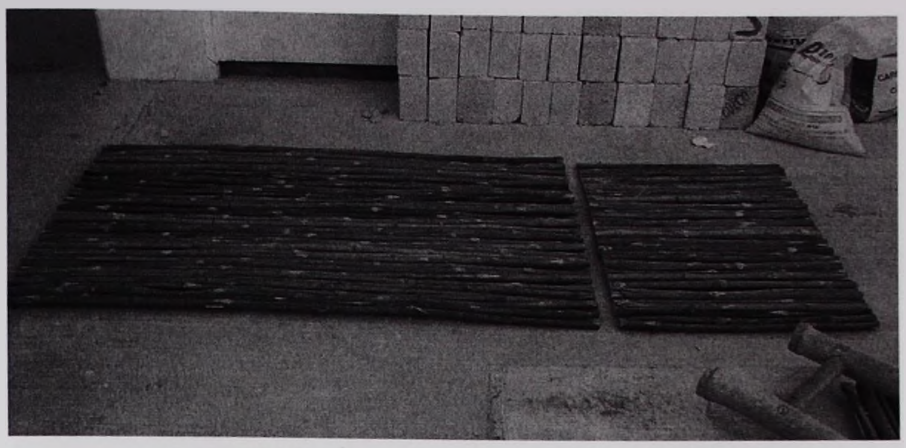


Imagen 3.58 Panel recortado para obtener la cumbrera

Fotografía: Carlos Uribe

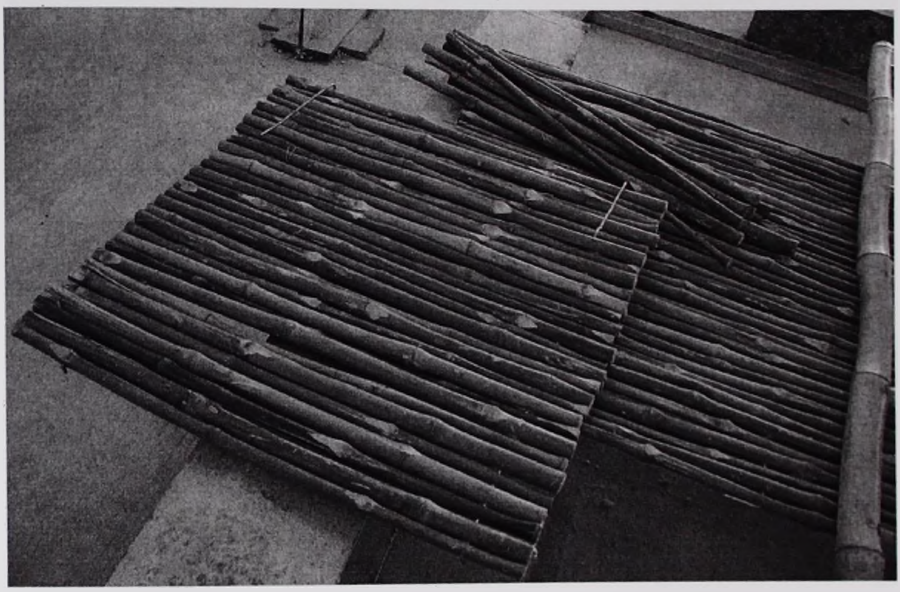


Imagen 3.59 Sustracción de cañas para obtener el tamaño requerido

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.60 Cumbrera terminada. Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.61 Aspecto final de la techumbre. Fotografía: Carlos Uribe

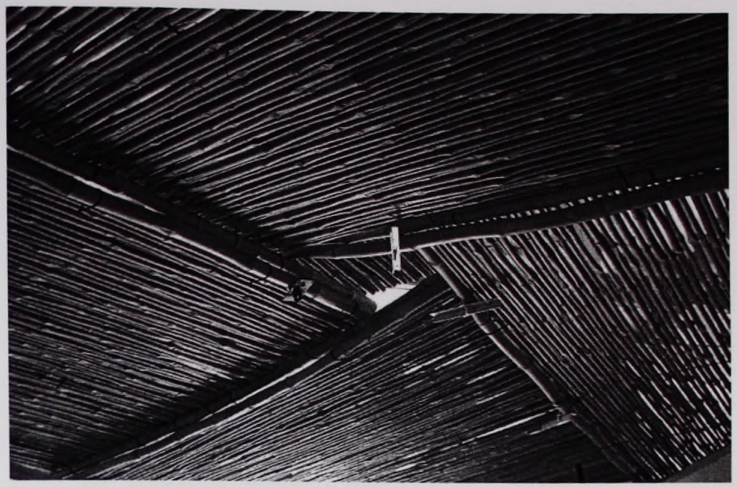


Imagen 3.62 Aspecto final de la techumbre (interior). Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.63 Aspecto final de la techumbre (interior). Fotografía: Carlos Uribe

De igual modo que en la elaboración de la estructura, el montaje de la cubierta pudo ser llevado a cabo por dos personas en el montaje y por una sola persona en la sujeción la cual no requirió ninguna herramienta especializada más que una "aguja" de alambre e hilo alquitranado.

3.2.3 Reutilización del sistema de techumbre

Esta última etapa representó una parte importante en cuanto que ayudaría a determinar la capacidad del sistema de techumbre desarrollado para ser reutilizado. Esto implicó la elaboración de una estructura auxiliar de soporte (dado que el modelo final instalado en laboratorio se apoyaba sobre una estructura metálica existente), el desmontaje del sistema de techumbre así como la estructura auxiliar, su estibado y traslado de lugar y finalmente la repetición del montaje.

Para la conformación de una estructura auxiliar de soporte de la techumbre, fueron diseñadas dos tipos de columnas experimentales, uno de estos tipos se colocaría en cada una las esquinas del marco de polines existente (columnas "esquineras"), y el otro como soporte auxiliar al centro (columnas "centrales"). Complementariamente se añadió un sistema simple de contravientos para rigidizar la estructura auxiliar (Imágenes 3.64 a 3.69).

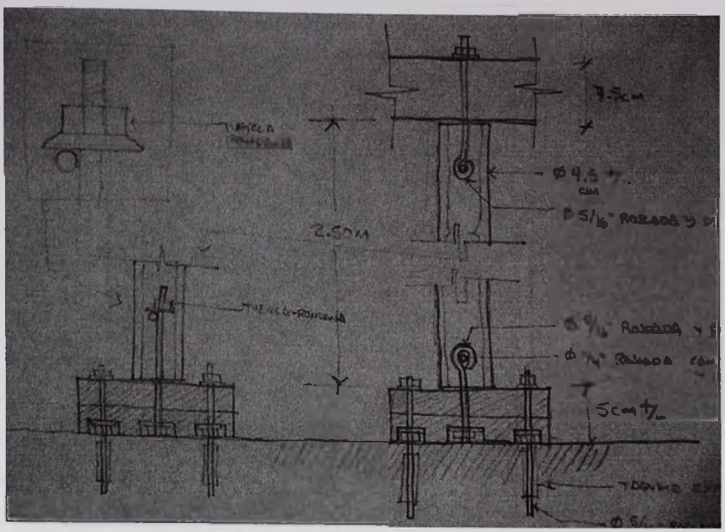


Imagen 3.64 Diseño de las columnas. Dibujos y fotografía: Carlos Uribe

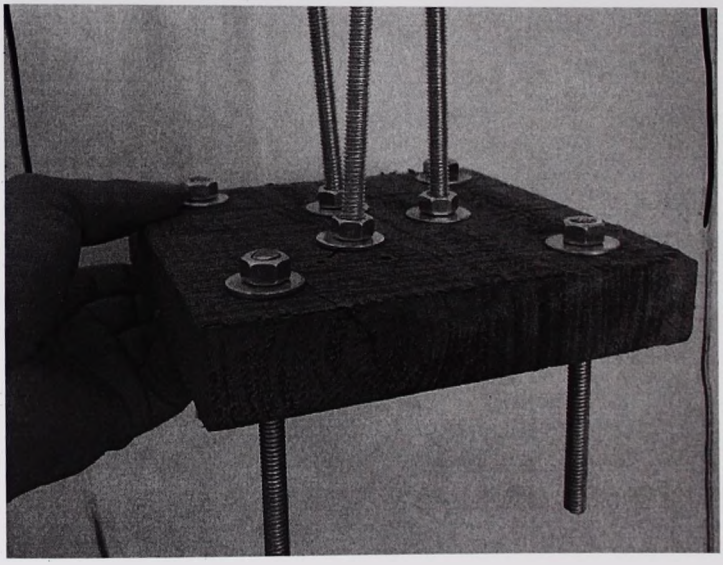


Imagen 3.65 Base inferior de una columna esquinera

Fotografía: Carlos Uribe

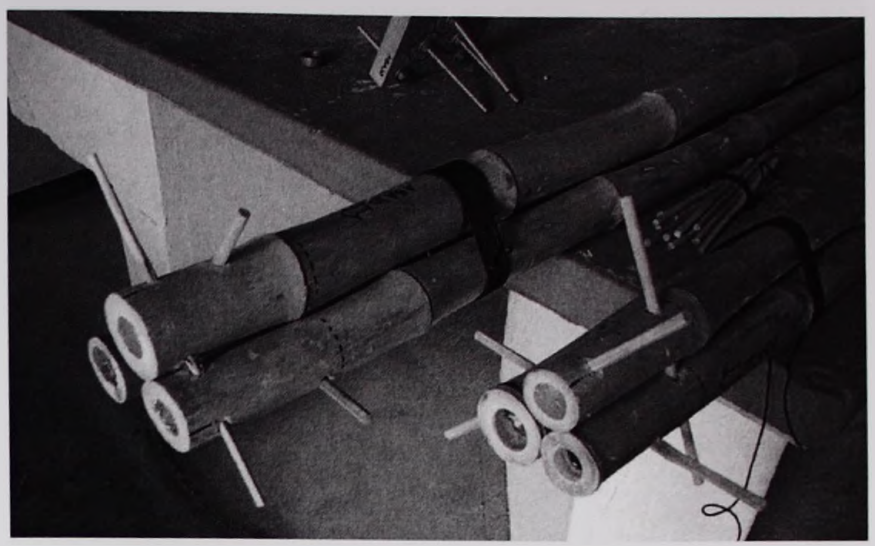


Imagen 3.66 Pasadores de bambú en columnas esquineras

Fotografía: Carlos Uribe

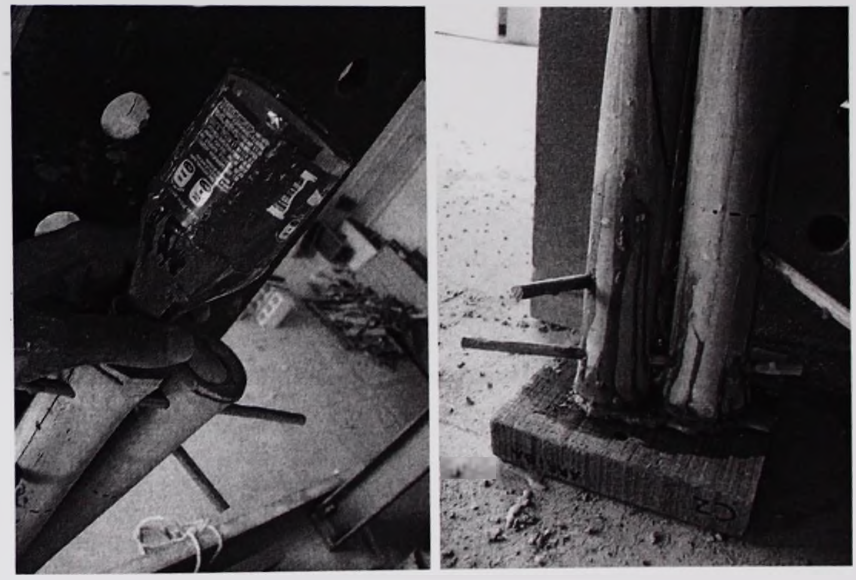


Imagen 3.67 Colado de concreto en los extremos de columnas esquineras

Fotografías: Carlos Uribe

Imagen 3.68 Columna esquinera terminada. Fotografía: Carlos Uribe

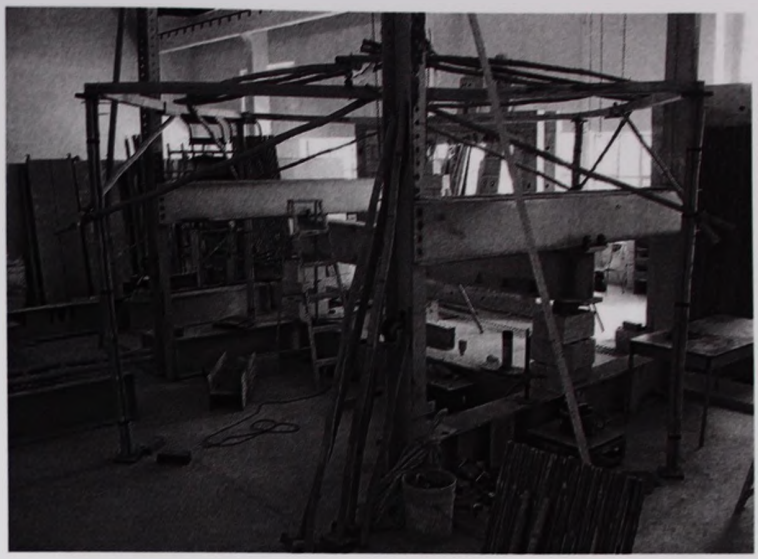


Imagen 3.69 Estructura auxiliar de soporte. Fotografía: Carlos Uribe

Procedimiento

Esta etapa comienza con el desmontaje provisional de los paneles de bambú antes de elaborar la estructura auxiliar (Imagen 3.70); a partir de ésta (Imagen 3.69), se procedió con el desmontaje y estiba del sistema de techumbre así como de la estructura mencionada (Imágenes 3.71 y 3.72).

Imagen 3.70 Sistema desmotado provisionalmente. Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.71 Sistema de techumbre desmontado y estibado

Fotografia: Carlos Uribe

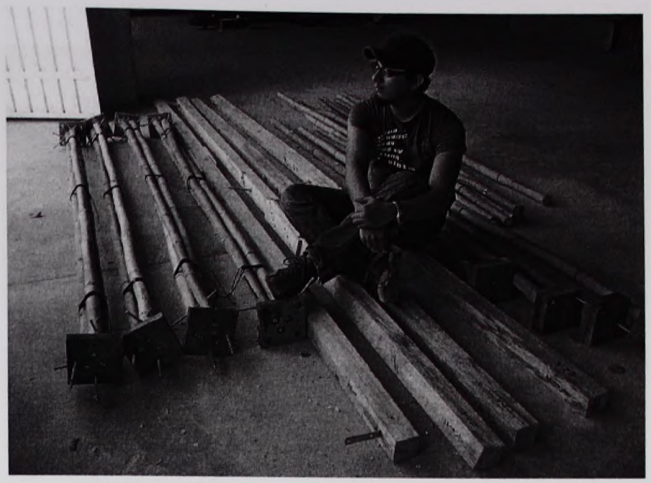


Imagen 3.72 Estructura auxiliar desmontada y estibada
Fotografía: Carlos Uribe

El siguiente paso correspondió a cargar la techumbre y la estructura auxiliar ya desmontados, en un vehículo de carga ligera, transportarlos y descargarlos en un nuevo sitio (Imágenes 3.73 y 3.74).

Imagen 3.73 Carga de los elementos (FIUADY) Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.74 Descarga de los elementos (FAUADY). Fotografía: Carlos Uribe

Finalmente se procedió al re-montaje de la estructura y del sistema de techumbre en el nuevo sitio. Es importante mencionar que el montaje de todos los elementos que fue llevado a cabo por estudiantes de la Facultad de Arquitectura sin ninguna experiencia previa en el uso del bambú.

El procedimiento inició con el armado del marco hecho a base de polines de madera al cual se le colocó la estructura de la techumbre, que fue también armada aparte. Para el armado de la estructura de la techumbre fueron usadas unas piezas de bambú auxiliares a modo de escantillón o guía (Imágenes 3.75. 3.76 y 3.77).

Imagen 3.75 Armado de la estructura de la techumbre

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.76 Marco de madera y estructura de la techumbre

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.77 Estructura de la techumbre sujeta al marco de madera

Fotografía: Carlos Uribe

Una vez armada la estructura del techo, fueron colocadas las columnas esquineras y luego sujetas con los contravientos hechos también de bambú, con cañas de aproximadamente Ø4.5 cm; hecho esto se procedió a anclar las columnas al piso por medio de taquetes metálicos de expansión para varilla roscada de Ø5/16" (Imágenes 3.78 y 3.79).

Imagen 3.78 Colocación de columnas esquineras y contravientos.

Fotografía: Carlos Uribe

Imagen 3.79 Anclaje de las columnas esquineras al piso

Fotografía: Carlos Uribe

Posteriormente, se colocaron las columnas auxiliares al centro de los claros anclándolas también al piso con taquetes metálicos de expansión para varilla roscada de Ø5/16", a lo que siguió la colocación y sujeción de los paneles de bambú que conforman la cubierta, así como la cumbrera, con lo que finalizó el montaje del Sistema de techumbre y la estructura auxiliar de soporte (Imágenes 3.80 a 3.83).

Imagen 3.80 Estructura de la techumbre y estructura auxiliar terminadas

Fotografía: Carlos Uribe

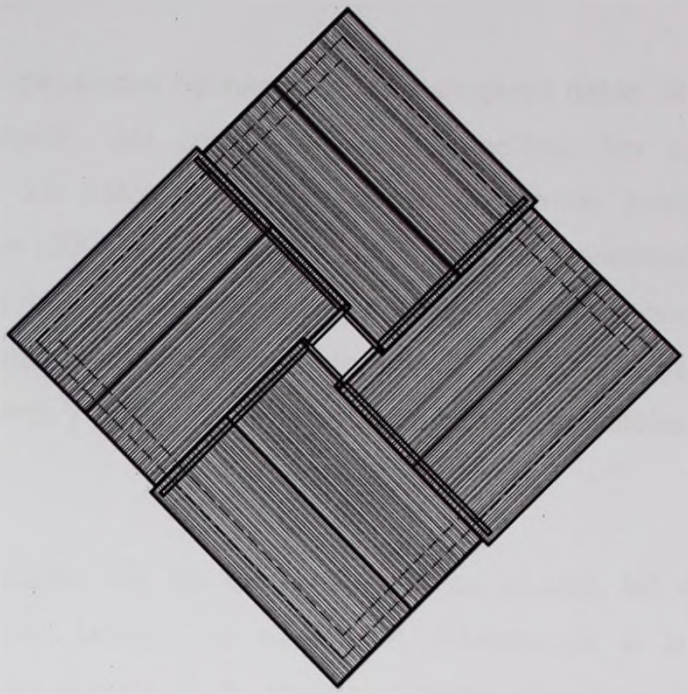
Imagen 3.81 Montaje y sujeción de los paneles. Fotografía: Gabriel del Castillo C.

Imagen 3.82 Colocación de la cumbrera. Fotografía: Carlos Uribe.

Imagen 3.83 Sistema de techumbre terminado. Fotografía: Gabriel del Castillo C.

Resultados

En este proceso se pudo observar la flexibilidad del sistema de techumbre para ser armado y desarmado, lo cual ayuda a la comprobación de la capacidad de poder ser reutilizado en caso necesario. Del mismo modo, pudo verificarse la autoconstructibilidad del sistema de techumbre fuera de un ambiente controlado (laboratorio); gracias al cual se revelaron diversas problemáticas durante el montaje generando experiencia útil en caso de repetirse el proceso.



CAPÍTULO 4

Discusión

CAPÍTULO 4
DISCUSIÓN

4.1 SEGURIDAD

Las pruebas mecánicas hechas al bambú arrojaron datos de compresión, flexión y tensión, así como de peso específico, los cuales fueron comparados con datos de otras especies de bambú mencionados por Oscar Hidalgo (2003) (*Dendrocalamus giganteous, Dendrocalamus asper, Gigantochloa robusta* y *Bambusa vulgaris var. striata*), así como con los de otros materiales usados comúnmente en la construcción, particularmente concreto, acero, y maderas de especies coníferas y latifoliadas (Capítulo 3, Tabla 3.1).

En la comparativa con las otras especies de bambú, los datos que se tomaron fueron Módulo de elasticidad, Resistencia a la compresión paralela y Resistencia a la tensión paralela. De las cinco especies comparadas, el *dendrocalamus strictus* resultó ser la más alta en el valor de módulo de elasticidad (154,384 kg/cm^2) y la tercera más alta en la resistencia a la compresión (544 kg/cm^2), mientras que en la resistencia a la tensión resultó ser la de valor más alto (2,136 kg/cm^2).

En cuanto al módulo de elasticidad obtenido a partir de las pruebas de flexión (154,384 Kg/cm^2), este resultó comparable a los indicados por otros autores aparte de Hidalgo para la especie *guadua angustifolia*:

- Entre 118,636 Kg/cm^2 y 142,768 Kg/cm^2 (González, 2007)
- 182,529 Kg/cm^2 (Minke, 2010)

Por otro lado, y despreciando la diferencia de especies de bambú probadas, en el módulo de elasticidad obtenido a partir de las pruebas de

compresión, flexión y tensión (Anexo 1), se observaron diferencias significativas entre ellos, así como en comparación con los valores indicados por Minke (2010):

Módulo de elasticidad (*dendrocalamus strictus*, Uribe, 2011):

- Compresión: 98,527 Kg/cm^2
- Tensión: 11,239 Kg/cm^2
- Flexión: 154,384 Kg/cm^2

Módulo de elasticidad (*guadua angustifolia*, Minke, 2010):

- Compresión: 187,627 Kg/cm^2
- Tensión: 211,081 Kg/cm^2
- Flexión: 182,529 Kg/cm^2

Por lo anterior, debe mencionarse que si bien existen diversas normativas para las pruebas de bambú tales como la propuesta por el INBAR (*International Network for Bamboo and Rattan*) en su "*Standard por Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo*", o la Norma ISO 22157-1 (*Bamboo, Determination of physical and mechanical properties*), las pruebas desarrolladas en este trabajo no contaron con normalización en sus probetas, por lo que no siguen a ninguna normativa en particular. Al respecto, se asume que distintos factores pueden afectar los resultados, tales como la variabilidad en la esbeltez de las probetas en las pruebas de compresión, o la sujeción de los extremos de las probetas y la geometría de las mismas en las pruebas a tensión, entre otros; en este sentido, se considerará como válido el valor del módulo de elasticidad obtenido de las pruebas de flexión, dada su semejanza con los valores indicados por los autores anteriormente mencionados.

Por su parte, en la comparación con los otros materiales empleados en la construcción, los datos muestran que las resistencias observadas en el bambú (544 kg/cm^2 a la compresión, 925 kg/cm^2 a la flexión, 2,136 kg/cm^2 a la tensión, y peso específico de 806 kg/m^3) resultan equiparables, y en algunos casos mayores que las de los otros materiales con los que se realizó la comparación, resultando su mayor ventaja la relación entre peso específico y resistencia, por lo que se puede afirmarse su viabilidad en la construcción de elementos constructivos, particularmente de la techumbre.

En cuanto a las pruebas de carga aplicadas al sistema completo de estructura + techumbre (prueba 2 de las tablas 4.1 y 4.2), se pudo observar un incremento promedio de 80% en la rigidez en comparación con las pruebas realizadas únicamente a la estructura (prueba 1 de las tablas 4.1 y 4.2), al ser aplicadas cargas puntuales en los puntos W1 y W2, presentando una rigidez mínima de 28kg/cm y máxima de 115kg/cm. (Tabla 4.1, Tabla 4.2).

W1						
Punto de aplicación:	Prueba 1 Carga total: 230.96kg	Prueba 2 Carga total: 230.34kg	Decremento	Prueba 1 Carga total: 230.96kg	Prueba 2 Carga total: 230.34kg	Incremento
	Desplazamiento			Rigidez		
LP3	37.46mm	19.99mm	46%	61.65kg/cm	115.23kg/cm	86%
LP2	74.65mm	37.90mm	49%	30.94kg/cm	60.67kg/cm	96%
LP1	89.37mm	53.62mm	40%	25.84kg/cm	42.95kg/cm	66%

Tabla 4.1 Comparativa de desplazamiento y rigidez (carga en W1)

W2						
Punto de aplicación:	Prueba 1 Carga total: 185.42kg	Prueba 2 Carga total: 185.31kg	Decremento	Prueba 1 Carga total: 185.42kg	Prueba 2 Carga total: 185.31kg	Incremento
	Desplazamiento			Rigidez		
LP3	44.64mm	28.75mm	35%	41.54kg/cm	64.46kg/cm	55%
LP2	96.44mm	49.58mm	48%	19.23kg/cm	37.38kg/cm	94%
LP1	N/D	66.06mm	N/D	N/D	28.05kg/cm	N/D

Tabla 4.2 Comparativa de desplazamiento y rigidez (carga en W2)

Para los paneles empleados en la cubierta, se comprobó que pueden ser cargados hasta con 200 kg/m^2 presentando flechas mínimas de 60 mm y máximas de 87 mm, mostrando una recuperación total después de ser descargados.

En relación a los efectos que causa la exposición a la intemperie (sol, lluvia, humedad) así como sus efectos sobre el material (contracción, dilatación, reseque dad), si bien no se identificaron efectos a largo plazo, debe mencionarse que los elementos a la fecha construidos con este material por parte de la empresa local que lo maneja, no han presentado problemas de degradación significativa. Particularmente un proyecto mencionado por el administrador de esta empresa, cuenta ya con 15 años de duración en un ambiente costero (desde 1996 a la fecha) sin daños considerables mas allá de la presencia de cierta humedad en el bambú[1].

En cuanto a la seguridad, el reglamento de Construcciones del municipio de Mérida, en su artículo 297, inciso H, indica que la carga viva máxima (W_m) que se deberá emplear para el diseño estructural será de 40 kg/m^2,

[1] Basado en la experiencia del Sr. Jeremy Faulk, encargado del cultivo de bambú en la hacienda Xixim.

cubiertas y azoteas con pendiente mayor del 5%[2]. En este sentido, considerando que la pendiente del sistema de techumbre es de 20%, que la carga aplicada al panel tipo fue de 206.83 kg/m^2, y añadiendo a este valor la rigidez del sistema completo, puede observarse que los resultados obtenidos en las pruebas de carga cumplen, e incluso superan los valores máximos aceptados para la construcción de techos en el municipio de Mérida.

En relación a las pruebas de comportamiento aerodinámico del sistema de techumbre desarrollado, se observó que a velocidades menores de 180km/h (velocidad teórica a escala 1:1 del modelo probado) el flujo del viento permanece laminar sobre el mayor porcentaje de la superficie de la cubierta. Cabe aclarar que si bien esta prueba tuvo un carácter cualitativo, su realización ayuda a determinar el comportamiento aerodinámico de la geometría de la techumbre. En este sentido, es posible afirmar un comportamiento seguro ante el viento, desde fenómenos atmosféricos catalogados como "depresión tropical" (velocidades de viento de 0 a 62km/h) hasta aquellos considerados como "huracán categoría 1" (velocidades de viento desde 118 hasta 153 km/h)[3].

Finalmente, tomando como base los resultados obtenidos, y considerando que las cargas no fueron aplicadas con el objetivo de conocer la resistencia máxima del sistema conformado por la estructura y la cubierta (tanto en las pruebas carga como en las pruebas aerodinámicas), puede afirmarse que éste es lo suficientemente seguro como para soportar diversos tipos de cargas vivas (hasta cinco personas simultáneas para eventuales trabajos de montaje o mantenimiento) y cargas muertas (peso propio de los materiales, así como algún elemento ajeno que

---

[2] Ayuntamiento de Mérida, 2004 , **Reglamento de Construcciones del municipio de Mérida**

[3] Escala de huracanes **Saffir-Simpson**, [http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_huracanes_de_Saffir-Simpson].

eventualmente pudiera alojarse encima de la techumbre), así como las fuerzas de arrastre que pudieran generarse en caso de presentarse vientos fuertes cercanos a los de un huracán Categoría I.

4.2 AUTOCONSTRUCTIBILIDAD

Considerando que la autoconstructibilidad se ha definido en el marco teórico como una amalgama entre los conceptos de "constructibilidad" y "autoconstrucción", los resultados de la experiencia en el proceso constructivo de la techumbre se definirán en relación a las características de estos dos conceptos.

Es una realidad que no todo proceso constructivo se lleva a cabo con la realización previa de un diseño, sin embargo en este caso, fue gracias a la planeación y el diseño, que el objeto pudo ser construido de un modo ordenado. La elaboración de dibujos, maquetas y planos jugó un papel importante dado que a partir de ellos, cada elemento constitutivo de la techumbre pudo ser planeado, construido y montado procurando optimizar los recursos materiales disponibles y aprovechar las cualidades intrínsecas de los materiales (Imágenes 4.1 y 4.2)

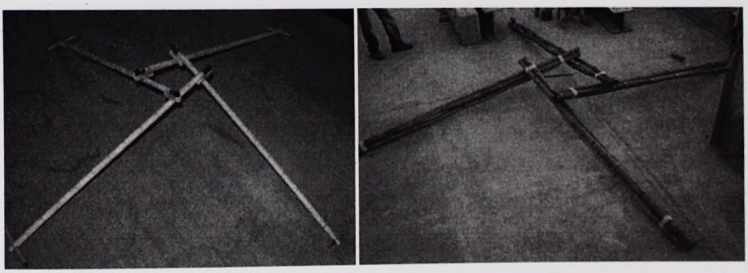


Imagen 4.1 Maqueta y primer modelo a escala real. Fotografías: Carlos Uribe

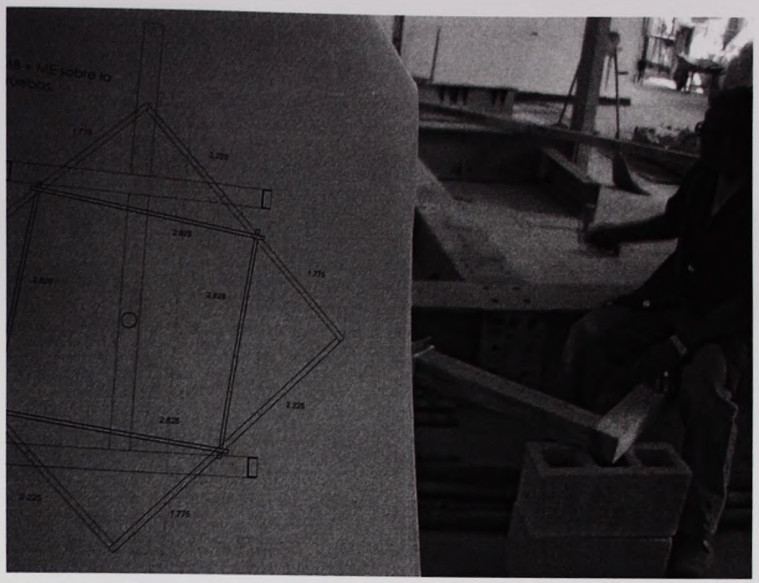


Imagen 4.2 Seguimiento de planos. Fotografía: Carlos Uribe

En lo relativo a la construcción del sistema de techumbre, tanto la fabricación de la estructura como su montaje, así como la colocación de los paneles que conforman la cubierta, pudo ser llevada a cabo con la mano de obra de tres personas sin la necesidad de herramientas o materiales especializados, reduciendo así el gasto económico al no considerar ni herramientas ni materiales costosos.

Debe mencionarse también que la facilidad de la construcción así como el armado y montaje del sistema se debió en gran parte al uso de elementos modulares con medidas estandarizadas: 2.50 m de longitud para los elementos de la estructura, y 2.50 x 1 m de área para los elementos de la cubierta así como a la relativa ligereza de los elementos (28.63 kg de peso en la estructura, y 28 kg de peso promedio por panel de cubierta).

A continuación, en la Tabla 4.3 se muestra la relación de mano de obra, herramientas y tiempo requerido para la elaboración y/o montaje, así como el peso de cada elemento tanto de la estructura como de la cubierta.

	Elaboración y montaje de la Estructura	**Montaje de la Cubierta**
Mano de obra.	2 personas.	3 personas.
Herramientas empleadas.	- Taladro: 1pza. - Segueta: 1pza. - Desarmador: 2pzas. - Escalera de aluminio: 2pzas.	- Alambre a modo de aguja para amarrar los paneles.
Materiales requeridos.	- Caña de bambú de 2.50m de longitud y Ø4.5cms: 8pzas. - Panel de bambú de 2.50 x 1m: 8 pzas. - Varilla roscada de acero de y Ø5/16": 2ml. - Tuerca de acero de 5/16": 8 pzas. - Mariposa de acero de 5/16": 8 pzas. - Rondana de acero de 5/16": 32 pzas.	- Hilo alquitranado: 1 rollo.
Peso del elemento.	28.63 kg	28.02 kg / panel.
Tiempo requerido.	Elaboración: 5 días. Montaje: 1 día.	Montaje: 1 dia.

Tabla 4.3 Relación de recursos empleados para la elaboración del sistema de techumbre. Elaboración: Carlos Uribe

Reutilización

Debido a que se planteó la necesidad de instalar el sistema de techumbre en otro sitio fuera del laboratorio, se presentó la oportunidad de probar la capacidad del sistema de techumbre de ser desmontado, transportado y re-instalado, en otras palabras, "reutilizado".

En resumen, el proceso pudo ser llevado a cabo y concluido en un tiempo estimado de 12 horas (sin contar tiempos muertos), y durante éste, se observaron diversas cosas como:

- El sistema de techumbre pudo ser desmontado y estibado, ocupando un espacio aproximado de 2.50 x 1.00 x 0.50 m (1.25 m^3), ayudando este dato en la selección del vehículo para poder transportarlo. En este caso en particular, el traslado fue realizado en una camioneta marca Nissan, Mod. NP-300 Estacas, cuya caja posee un volumen de 2.75m^3.

- Su traslado fue llevado a cabo sin la necesidad de maquinaria auxiliar especializada tal como grúas o vehículos de carga pesada, dado que el peso total de la techumbre asciende a 250kg, distribuido en 8 elementos de 28 kg (paneles), y 10 elementos de 2.6 kg (cañas que conforman la estructura y el escantillón) los cuales pueden ser cargados individualmente por una sola persona. Cabe aclarar que el vehículo empleado para el traslado cuenta con una capacidad de carga de 1,204 kg.

- La experiencia previamente adquirida en laboratorio facilitó la dirección del grupo de montaje, el cual no contaba con experiencia previa en el manejo del bambú en construcción. En este sentido, y tomando en cuenta los datos de la tabla 4.3, puede determinarse un tiempo de 6 días de aprendizaje para la elaboración y el montaje de todo el sistema, y un tiempo de 1 día para el aprendizaje de únicamente el montaje.

- Al no presentarse deterioro en ninguno de sus elementos, se pudo comprobar su reutilización. Al respecto, puede estimarse un ciclo mínimo de 5 reutilizaciones, considerando el caso en que tanto sus uniones como los elementos del sistema en sí no se encuentren frecuentemente sujetos a cargas extremas durante su periodo de uso. Cabe señalar que el ciclo de reutilización estimado habrá de ser comprobado a través de la experiencia de uso, montaje y desmontaje, de modo que pueda establecerse de un modo cuantitativo esta propiedad.

De lo anterior, la reutilización figura como un atributo extra que si bien no está mencionado dentro de las características de "autoconstructibilidad" definidas en el marco teórico, representa un hallazgo que debe ser considerado tanto en la autoconstructibilidad del sistema, como en el impacto ambiental que éste presenta al no implicar ningún desecho una vez terminado su periodo de función.

Así mismo, el hecho de que el montaje haya podido ser llevado a cabo por personas sin experiencia, comprueba la facilidad de su instalación, y en relación a una eventual fabricación sistemática de los elementos, su diseño simple y el requerimiento de herramientas sencillas puede aventurar también, una relativa facilidad en este aspecto.

Finalmente, dado que el sistema de techumbre desarrollado emplea elementos modulares en todos sus componentes, su elaboración resulta susceptible de ser sistematizada, lo cual implica la posibilidad de ser elaborada a un nivel industrial a pequeña escala, a través de la cual se va adquiriendo experiencia, incrementando la eficacia y eficiencia del proceso constructivo, optimizando así los recursos.

4.3 IMPACTO AMBIENTAL

Es importante aclarar que si bien el empleo del bambú como material constructivo implica por sí mismo un bajo impacto ambiental, e incluso representa efectos positivos al medio ambiente en comparación con los elementos constructivos que utilizan concreto y acero, el impacto ambiental del bambú aquí abordado se referirá específicamente a su uso como material constructivo en el sistema de techumbre desarrollado en este trabajo.

Como recurso vegetal, y en comparación con el uso de la madera, el sistema de techumbre desarrollado hace uso del bambú aprovechando su geometría irregular natural, hecho que implica un ahorro de energía al no tener que ser previamente mecanizado o transformado, sin contar el desgaste de las herramientas necesarias para este proceso. Por otro lado, el proceso de transformación de la madera produce residuos que posteriormente deben ser extraídos o absorbidos, empleándose para ello diversos sistemas mecánicos tales como sistemas de extracción o aire comprimido, lo cual añade un mayor consumo energético al proceso en general.

Según Janssen (1981)[4], la energía usada para la producción de bambú es de 300 MJ/m^3, comparada con 600 MJ/m^3 necesarios para la producción de madera. Así, considerando que el peso del bambú en el sistema de techumbre desarrollado es de aproximadamente 250 kg, con un peso volumétrico de 806 kg/m^3, tenemos un volumen de 0.31 m^3 de bambú, con una consumo de energía de 93 MJ, mientras que este mismo volumen en madera requeriría de 186 MJ.

[4] Janssen, 1981, en Minke, Gernot, 2010.

Si este mismo criterio lo empleamos para verificar el consumo energético del acero empleado en la techumbre desarrollada y lo comparamos con el acero requerido en un sistema de techumbre con cubierta de lámina de acero (comúnmente empleada en la vivienda autogestionada) que cubra la misma superficie (4 x 4m), tendremos la cantidad de 1 kg y 101 kg, ó 0.00013 m^3 y 0.013 m^3 respectivamente. Al respecto, Janssen (1985)[5] señala que producir 1 m^3 de acero requiere 50 veces más energía que producir 1 m^3 de bambú, es decir, producir 1 m^3 de acero equivaldría a 15,000 MJ. Así, el consumo energético del acero requerido en la techumbre de bambú sería de 1.95 MJ, mientras que para una techumbre con cubierta de lámina se requerirían 195 MJ.

En cuanto al reciclaje y la generación de desechos, si establecemos que la techumbre de bambú tiene la posibilidad de reutilizarse mínimo en 5 ocasiones, esto implicaría el ahorro de al menos 1,250 kg de desechos, considerando que la techumbre tiene un peso de 250kg.

En resumen, puede afirmarse que la principal ventaja del uso del bambú en la techumbre desarrollada se concentra en su bajo consumo energético tanto en su producción a modo de materia prima, como en su producción a modo de elemento constructivo; lo anterior, complementado por su posibilidad de ser reutilizado con el ahorro en desechos que esto implica.

4.4 ECONOMÍA

La economía del sistema de techumbre de bambú se reflejará en un breve desglose de costos de los elementos constructivos y complementarios empleados en su desarrollo, descritos a continuación:

[5] Janssen, 1985, en K.Ghavami, 1995.

Descripción:

Sistema de techumbre compuesto por tres elementos: una estructura hecha a base de cañas de bambú, una cubierta hecha con paneles de bambú (la cual es colocada sobre la estructura), y finalmente una membrana impermeable aplicada sobre los paneles.

Desglose del sistema:

1. Estructura:

- Material requerido: 8 cañas de bambú de aprox. Ø4.5 cm y 2.5 m de longitud.
- Costo total del material: $330.00 M.N ($280 bambú + $60 herrajes)

2. Cubierta:

- Material requerido: 8 Paneles de 2.50 x 1.00 m, hechos con cañas de aprox. Ø2.5 cm. y 2.5 m de longitud.
- Costo total del material: $6,000.00 M.N

3. Membrana impermeable[6]:

- Material requerido: 60 m^2 de tela de manta, 25 Lt de barniz de poliestireno reciclado.
- Costo total del material: $3,180.00 M.N

Costo total del sistema de techumbre de bambú: $9,150.00 M.N

[6] El desarrollo de esta membrana, forma parte de la tesis de licenciatura en Ingeniería Industrial del Br. Juan Sebastián Couoh Nah, alumno del Instituto Tecnológico de Oxkutzcab Yucatán, tutorada por el Dr. J. Gonzalo Carrillo Baeza del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) Mérida Yucatán, México (2011).

Con fines comparativos, se muestra a continuación el costo de otros sistemas de techumbre comúnmente empleados en la vivienda autogestionada:

1. Estructura y cubierta de bambú: $9,150 M.N
2. Sistema de vigueta y bovedilla: $9,547 M.N
3. Estructura de madera y lámina de cartón petrolizada: $1,185 M.N
4. Estructura de madera y lámina metálica: $2,270 M.N

Si consideramos que la competencia más inmediata en relación costo-beneficio es el sistema de vigueta y bovedilla (ver en 4.5 Comparativo), el principal ahorro se refleja tanto en el bajo consumo energético que la producción de los materiales requiere (bambú versus cemento y acero), como en la posibilidad de autoconstrucción y ahorro económico en mano de obra que el sistema de bambú presenta, cualidad que no posee el sistema de vigueta y bovedilla, principalmente por el peso de los elementos cuyo manejo requiere de cierta capacidad física en los ejecutantes, así como la necesidad de conocimientos y experiencia para la construcción del sistema en general.

4.5 COMPARATIVO

A modo complementario, se llevó a cabo un análisis comparativo entre el Sistema de techumbre de bambú, y otros tres sistemas de techumbre habitualmente usados en la construcción de la vivienda autogestionada, ya sea de carácter provisional o permanente, de modo que pudieran posteriormente concluirse ventajas y desventajas entre cada una de los sistemas comparados.

Los sistemas comparados fueron:

1. Sistema de Estructura de cañas y Cubierta de paneles de bambú, con Membrana impermeable (Bambú).
2. Sistema de Vigueta y Bovedilla (B y V).
3. Sistema de Estructura de madera, con Cubierta de láminas de cartón petrolizadas (L de C).
4. Sistema de Estructura de madera con Cubierta de lámina metálica galvanizada (L de M).

Dicha comparación incluyó los siguientes parámetros:

- Peso total.
- Costo total.
- Durabilidad estimada.
- Acero contenido.

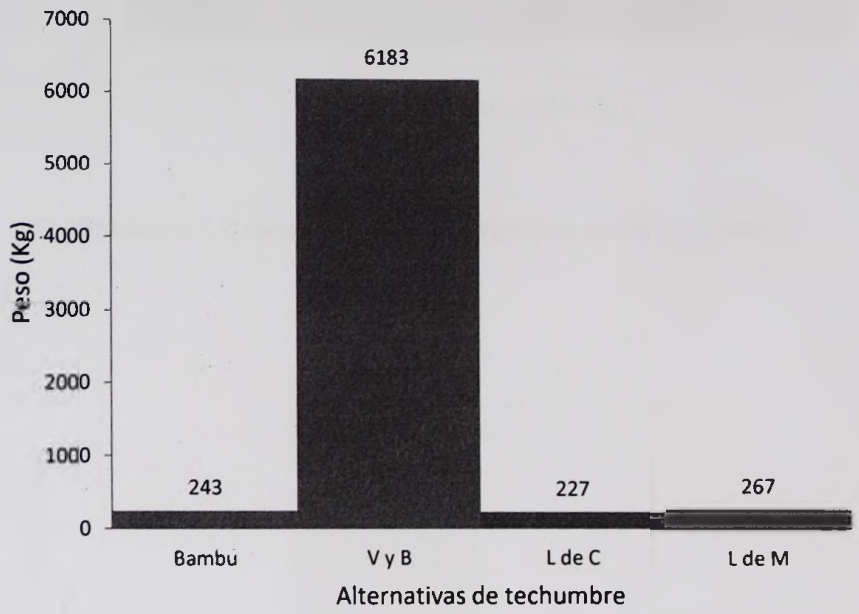
Los datos obtenidos a partir de la caracterización y análisis de cada uno de estos sistemas se ven reflejados en la Tabla 4.4, (datos más detallados de cada uno de los sistemas comparados se encuentran en el Anexo 3) así como en las gráficas que a continuación se presentan:

	Peso total (kg)	Costo total (MNX)	Durabilidad estimada (años)	Acero contenido (kg)
Bambú	243	9,510	10/15	1.05
V y B	6,183	9,547	50[7]	46.8
L de C	227	1,185	3	1.5
L de M	267kg	2,270	5/10 años	101kg

Tabla 4.4 Datos comparativos entre las 4 alternativas de techumbre

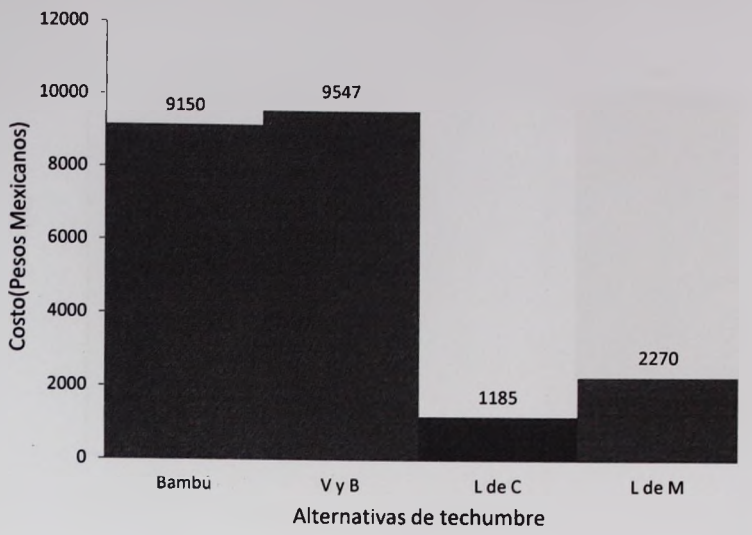
Elaboración: Carlos Uribe

Gráfica 4.1 Comparativa de peso (kg)

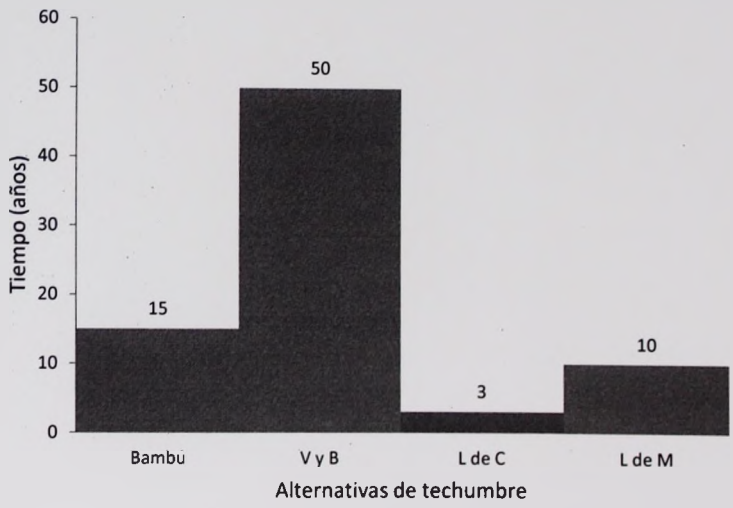


[7] Tomado de: Do Lango, Paulo Roberto, (sin fecha) **Estructuras de concreto, proyectar para la durabilidad,** Seccional colombiana del ACI, Colombia,

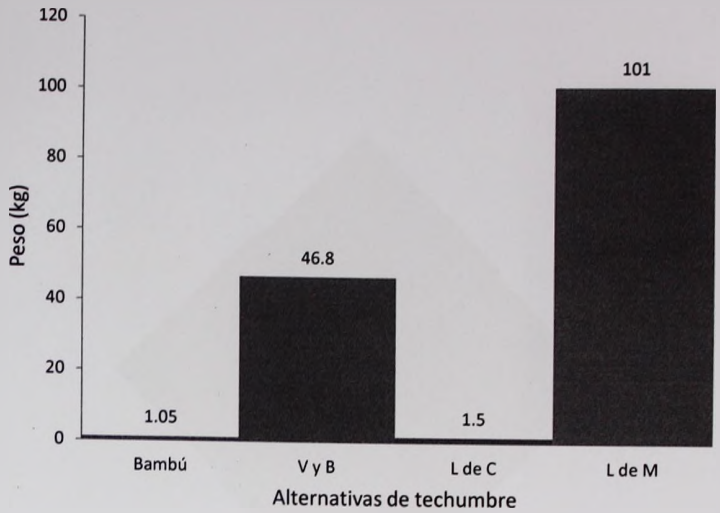
Gráfica 4.2 Comparativa de costo total (MXN)

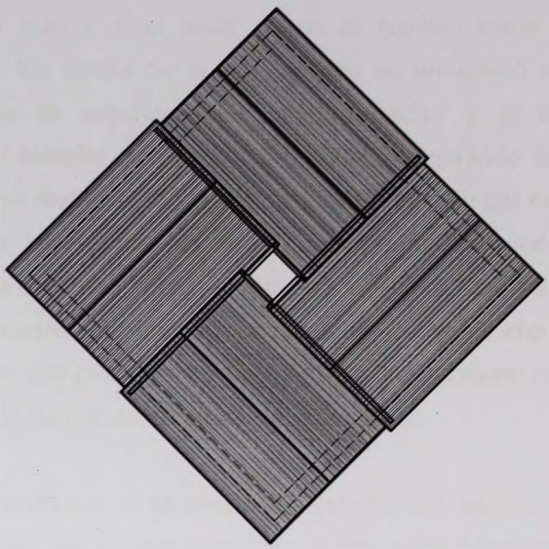


Gráfica 4.3 Comparativa de durabilidad estimada (años)



Gráfica 4.1 Comparativa de acero contenido (kg)





CAPÍTULO 5

Conclusiones

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

Si bien estudios ulteriores serán necesesarios para vislumbrar todas las posibilidades que a nivel local ofrece el bambú como material de construcción, los límites de la investigación se enfocaron en demostrar principalmente la seguridad, la constructubilidad y el bajo impacto ambiental del sistema de techumbre propuesto, figurando además como un hallazgo su reutilización, cuya frecuencia habrá de ser comprobada a través de la experiencia de uso. De este modo, queda abierta la posibilidad de detallar o incluso proponer alternativas para elementos tales como la geometría, las uniones, opciones de cubiertas impermeables, o algunos otros que pudieran complementar o perfeccionar el Sistema de Techumbre de Bambú desarrollado en este trabajo.

Así mismo, temas que no se trataron en este trabajo, pero que se deberán tomar en cuenta por su importancia en el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías en un contexto cultural particular, son aspectos como la durabilidad, la apropiabilidad de un sistema constructivo y una geometría diferentes a lo habitualmente empleado como sistema autoconstruible en la región, la transferencia tecnológica, la sistematización, el cultivo a pequeña y gran escala de una especie vegetal no endémica, entre otros.

En los párrafos siguientes, se exponen las conclusiones relacionadas puntualmente con los objetivos planteados.

5.1 SEGURIDAD

Pruebas mecánicas al bambú

Del comparativo realizado con otras especies de bambú mencionadas por Oscar Hidalgo (2003, en Minke 2010), puede concluirse que en cuanto a su módulo de elasticidad y a su resistencia a compresión y tensión paralelas, el bambú de la especie *dendrocalamus strictus* es una referencia adecuada en cuanto a sus cualidades mecánicas para su uso en la construcción.

Por su parte, del comparativo realizado entre el bambú de la especie *dendrocalamus strictus* y los materiales de uso más frecuente en la construcción (concreto, acero y madera), pudo observarse la viabilidad de su aplicación en la construcción de techumbres (y de la vivienda en general), resultando en todos los casos su principal ventaja la relación entre su peso y su resistencia.

Siendo poco más de nueve veces más ligero que el acero, alcanza cerca de la mitad de su resistencia a la tensión; caso semejante se observa en relación al concreto de uso generalizado y su resistencia a la compresión, pues pesando apenas una tercera parte que éste, su resistencia es casi del doble.

En comparación con las maderas, si bien su densidad es mayor que la de las coníferas Clase B, resulta 5% más ligera que las maderas de especies latifoliadas del Grupo I.

Presenta el 60% de resistencia a la compresión que las latifoliadas y 15% más que las coníferas; así mismo presenta casi la misma resistencia a la flexión que las coníferas pero más del doble de resistencia a la tensión.

Si a lo anterior se suma su velocidad de crecimiento, y se considera que el tiempo requerido para su utilización puede ser de tan solo tres años, el bambú, como material de construcción, se ubica entonces como una alternativa sustentable y aplicable en la región, en donde el uso de la madera de modo tradicional ha disminuido por la ausencia de una cultura de reforestación, así como por el prolongado tiempo que se requiere para su aprovechamiento.

Prueba de carga a la estructura

Tomando como base los resultados obtenidos, y considerando que las cargas no fueron aplicadas con el objetivo de conocer la resistencia máxima de la estructura, puede afirmarse que ésta es lo suficientemente rígida como para soportar distintos tipos de cubiertas ligeras (incluyendo los paneles de bambú cuyo peso es de aproximadamente 15 kg/m^2), así como el peso de dos o más personas (en esta primera prueba) que eventualmente tuvieran que realizar trabajos de montaje y/o mantenimiento.

A nivel general, y desde un aspecto cualitativo, no se observaron deformaciones definitivas significativas, pues las pruebas mostraron una recuperación de los elementos de bambú después de eliminadas las cargas, sin embargo pudo observarse que las únicas deformaciones "permanentes" se presentaron en las varillas roscadas de la cumbrera, las cuales, si bien no repercutieron significativamente sobre la estructura, sí resultan un indicativo de los puntos en donde las cargas pudieran tener mayor injerencia.

Pruebas de carga al Sistema (estructura + cubierta)

El considerable incremento en la rigidez del sistema al ser probado con la cubierta instalada revela una mayor estabilidad, así como un comportamiento más seguro ante cargas vivas, muertas y accidentales,

pudiéndose considerar diversas opciones de cubiertas impermeables. Armado el sistema, pudo comprobarse después, que fue incluso capaz de soportar el peso de hasta cinco personas.

En esta prueba tampoco se observaron deformaciones definitivas significativas en comparación con las pruebas de carga realizadas a la estructura sin la cubierta, pues los datos mostraron una total recuperación de los elementos de bambú después de eliminadas las cargas.

Prueba de carga al panel tipo

Amén de realizar cálculos y pruebas más precisas respecto a la resistencia de los paneles, puede concluirse que, de manera general, los paneles pueden ser cargados hasta con 200kg/m^2 sin que se presenten fallas o deformaciones permanentes significativas. Si bien al aplicar la carga el elemento presentó un efecto de flexión, esto deberá relacionarse con su flexibilidad y resistencia a la flexión, analizados con anterioridad.

Como dato extra, cabe mencionar que el panel aún cargado con los 455kg de los bloques de concreto, pudo soportar el peso de una persona sin presentar fallas o deformaciones.

Lo anterior revela la posibilidad de emplear elementos impermeables de hasta 200 kg/m^2, dentro de los cuales pueden considerase los Techos verdes así como diversos morteros.

Prueba de comportamiento aerodinámico

Considerando que la máxima velocidad del viento durante los huracanes que más estragos han causado a la península en los últimos años fueron de 296 km/h y 250 km/h (Gilberto en 1988 e Isidoro en 2002, respectivamente), puede asumirse que el comportamiento aerodinámico de la techumbre resultó relativamente seguro hasta velocidades menores

a los 180 km/h, a partir de las cuales se empezó a observar un comportamiento turbulento. En la escala Saffir-Simpson esto incluiría velocidades de viento consideradas como "depresión tropical" (velocidades de viento desde 0 hasta 62 km/h), "tormenta tropical" (velocidades desde 63 hasta 117 km/h), hasta un "huracán categoría 1" (velocidades desde 118 hasta 153 km/h)[1].

Cabe señalar que es importante que el sistema se encuentre adecuadamente sujeto al perímetro de la casa hecha de muros de block, pues de esto dependerá en gran medida la seguridad que ésta pueda ofrecer.

Conclusiones generales de seguridad

Para el bambú (*dendrocalamus strictus)* como material constructivo, las pruebas mecánicas arrojaron datos que al ser comparados con las propiedades mecánicas de otras especies de bambú, resultaron equiparables, y al ser comparado con las propiedades mecánicas de otros materiales usados en la construcción (concreto, acero y maderas) resultaron ser también equiparables y en algunos casos mejores, esto principalmente por su peso específico relativamente bajo, lo cual le otorga mayor versatilidad al poder ser un material constructivo que puede emplearse en casi todos los componentes de una vivienda, tanto estructurales como no estructurales tales como vigas, columnas, cerchas, cubiertas, rampas, escaleras, muros, cercas, etc. garantizando en todos los casos una seguridad estructural.

En cuanto al Sistema de Techumbre de Bambú (estructura + cubierta), las pruebas de carga demostraron un incremento considerable en la rigidez al ser sujeta la cubierta a la estructura, lo cual, sumado a su peso total

[1] Escala de huracanes **Saffir-Simpson**, [http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_huracanes_de_Saffir-Simpson].

(250kg aproximadamente) hace de ella un elemento menos susceptible de daño o desprendimiento ante los diversos agentes externos que pudieran implicar un riesgo para sus habitantes.

Por otro lado, pudo comprobarse que la capacidad de carga del Sistema de Techumbre de Bambú cumple, e incluso supera por cinco veces lo establecido en el reglamento de Construcciones de Mérida en relación con cubiertas o azoteas con pendiente, lo cual garantiza el requerimiento mínimo establecido por dicho reglamento.

Finalmente, y considerando que la península de Yucatán es una zona propensa a recibir el embate de ciclones ó huracanes, a través de las pruebas de comportamiento aerodinámico el Techo de Bambú demostró ser un elemento estable y seguro ante velocidades de viento considerablemente altas dado el flujo laminar observado en la superficie de la cubierta a estas velocidades, lo cual resulta particularmente una ventaja en una zona propensa al embate de fenómenos meteorológicos como la nuestra.

En resumen, y por todo lo anteriormente indicado, puede concluirse que el Sistema de Techumbre de Bambú es un elemento que hará de la vivienda autogestionada (particularmente la que se basa en el módulo tipo), frecuentemente cubierta con materiales perecederos, un sitio más seguro para vivir.

5.2 AUTOCONSTRUCTIBILIDAD

Elaboración de la estructura y colocación de la cubierta

Partiendo de las descripciones correspondientes, se concluye que la estructura es un elemento totalmente autoconstruible, dado el bajo nivel de especialización, mano de obra y herramientas requeridas para su

construcción; mismo caso para la cubierta, que si bien no requirió de herramientas específicas, su montaje pudo llevarse a cabo con relativa facilidad.

Reutilización

Por su parte, la reutilización del sistema pudo ser comprobada a partir del ejercicio de desmontaje, traslado y re-montaje, revelando su versatilidad de uso tanto como elemento permanente como provisional, y ampliando su rango de utilidad en comparación con otros sistemas de techumbre, provisionales o no.

Conclusiones generales de autoconstructubilidad

Atendiendo los principios que caracterizan a la autoconstructibilidad, debe mencionarse que durante el proceso de desarrollo del Sistema de Techumbre de Bambú, la planeación, el diseño y la elaboración de maquetas y planos lograron facilitar la construcción del prototipo evitando también el derroche de tiempo y logrando la optimización de recursos.

El empleo de elementos relativamente compactos, modulares y ligeros, así como el uso de herramientas sencillas, hizo más simple la fabricación, el montaje y el desmontaje del sistema, así como su eventual almacenaje, traslado y reutilización, lo cual hace de éste Sistema de Techumbre un elemento altamente distribuible y accesible a un mayor número de personas en comparación con otros sistemas más pesados o de dimensiones mayores. Así mismo, estas cualidades logran que el Techo de Bambú pueda adaptarse al ahorro familiar, y a la construcción progresiva, considerando la posibilidad de ir techando las piezas según se vayan construyendo.

Así mismo, su diseño considerablemente sencillo, lo hace una tecnología apropiable dado que sus elementos son muy simples de fabricar y armar,

facilitando la transferencia tecnológica, y permitiendo que pueda ser comprendida rápidamente y posteriormente llevada a cabo por personas sin previa experiencia, sin conocimientos técnicos específicos e incluso por cualquier integrante de la familia capaz de manipular los elementos que conforman al sistema. Estas cualidades hacen del sistema propuesto una alternativa competitiva frente al sistema de viguetas y bovedillas, el cual no cumple con la autoconstructibilidad, principalmente por ser un sistema que requiere de cierta capacidad física, así como de herramienta y mano de obra relativamente especializada para su elaboración.

Por todo lo anterior, puede concluirse que la autoconstructubilidad y la reutilización del Sistema de Techumbre de Bambú son dos de las características que hacen de él un verdadero sistema alternativo y sobre todo accesible a cualquier sector de la sociedad.

5.3 IMPACTO AMBIENTAL

Dado que el uso del bambú como material constructivo en sí mismo implica diversos efectos positivos al medio ambiente durante su producción tales como, reducción de la erosión del suelo, retención de agua,fijación de CO_2, bajo consumo energético, etc., puede considerarse en primera instancia un impacto ambiental no solamente bajo, sino incluso positivo en su uso para la producción de vivienda.

No obstante, dentro del desarrollo del Sistema de Techumbre de Bambú, sus ventajas siguen aumentando. Considerado un material vegetal, su primera comparación suele hacerse con la madera; en este sentido, el hecho de que el bambú no presenta la necesidad de ser previamente transformado o mecanizado, hace de éste una mejor alternativa al implicar un menor consumo de energía en transformación, sin considerar gastos

secundarios como por ejemplo el desgaste de herramientas. Por otro lado, el consumo energético de la producción necesaria para la Techumbre de bambú representa tan solo la mitad del necesario para producir el mismo volumen de madera.

En cuanto a la cantidad de acero necesario para la elaboración de la Techumbre de Bambú, en comparación con el acero requerido para un Sistema de Techumbre con cubierta de lámina metálica que cubra la misma superficie, su producción implica un consumo energético cien veces menor.

Así mismo, considerando que el Sistema de Techumbre de Bambú posee la cualidad de ser reutilizable, estimando para esto un ciclo de al menos cinco ocasiones, el ahorro en la producción de desechos en comparación con los otros sistemas es muy superior (ahorro de al menos 1,250kg de desechos, considerando un peso de 250 kg multiplicado por cinco).

Finalmente, dado que este Sistema está fabricado con un material vegetal biodegradable, su desecho al final de su periodo de vida no implicará un efecto contaminante, reintegrándose al ciclo natural de los recursos renovables.

En este sentido, puede establecerse un bajo impacto ambiental a través del uso del bambú como material constructivo, representando una alternativa adecuada en el desarrollo de vivienda, y específicamente en la construcción del sistema de techumbre desarrollado en este trabajo.

5.4 ECONOMÍA

A pesar de que el costo del Sistema de Techumbre de Bambú fue apenas un poco menor que el del Sistema de Vigueta y Bovedilla (el más costoso de los sistemas comparados), su relación costo-beneficio puede asumirse como una ventaja dado el hecho que su empleo no implica inversión en mano de obra, y en comparación con otros sistemas perecederos de techumbre comúnmente en la vivienda autogestionada, tampoco implica un gasto extra en caso de una eventual sustitución de elementos deteriorados por la intemperie, ó por el desecho de material en caso de ser sustituido, dada su posibilidad de ser reutilizado, considerando para esto, un periodo de vida de al menos quince años.

Esto significa que al invertir en una techumbre de bambú, se obtiene un producto que al poder ser reutilizado, beneficiaría a más familias con una sola inversión, además que se evitaría la generación de desechos.

Por otro lado, considerando la factibilidad del Sistema de Techumbre de Bambú de ser sujeto a un proceso sistematizado y/o de semi-industrialización, se lograría una producción intensiva que por consecuencia implicaría una reducción considerable en los costos finales.

Finalmente, la eficiencia energética del bambú (tanto en su cultivo como en su transformación y fabricación de elementos) en comparación con la madera y el acero, debe ser considerada una ventaja económica por el ahorro que ésta implica.

5.5 COMPARATIVOS

A través del comparativo llevado a cabo entre los diversos sistemas de techumbre seleccionados, podemos determinar que:

- El sistema de vigueta y bovedilla es el más pesado, lo cual se traduce en mayor dificultad para su montaje y la necesidad de mano de obra con características particulares.

- Si bien el costo del sistema de vigueta y bovedilla no es el más bajo, su posibilidad de ser reutilizado, así como de sistematizar su producción, implicaría a futuro aún un menor costo.

- El Sistema de Techumbre de Bambú es más durable que los sistemas de techumbre que emplean Lámina de cartón petrolizada, y Lámina de acero, lo cual garantiza un mayor periodo de uso, haciendo de éste una mejor alternativa dado que no implica la necesidad de adquirir y sustituir elementos deteriorados, implicando un menor gasto, y evitando las diversas molestias que implica la presencia de fallas en el techo, tales como disminución de confort, así como el trabajo requerido para su reparación. Por otro lado, aunque la durabilidad estimada del Sistema desarrollado esté por debajo de la durabilidad del sistema de vigueta y bovedilla, existe la posibilidad de que el bambú empleado en este trabajo presente mayor durabilidad la cual habrá de comprobarse con la experiencia y paso del tiempo.

- El sistema de techumbre de bambú, junto con el de lámina petrolizada son los que menos acero contienen, implicando esto un menor consumo energético en la elaboración de este material, así como su consecuente disminución de contaminación.

- Finalmente, en comparación con el sistema de vigueta y bovedilla, el sistema de techumbre de bambú puede ser realizado mediante autoconstrucción, además de poder ser reutilizado, ventaja que no presenta ninguno de los otros sistemas aquí comparados.

En resumen, puede concluirse, a partir de lo anteriormente mencionado, que el sistema de techumbre de bambú resulta la mejor de las cuatro alternativas comparadas dadas sus posibilidades de autoconstrucción, la posibilidad de reducción de costos, su durabilidad, su bajo requerimiento de acero, así como su posibilidad de ser reutilizado.

5.6 TESIS

Considerando que todos los procesos llevados a cabo en esta investigación demostraron la resistencia del bambú como material constructivo para la elaboración de estructuras y cubiertas seguras, permitiendo la obtención de un prototipo de Sistema de Techumbre Alternativo, y comprobándose su autoconstructibilidad y su posibilidad de ser reutilizado, con las ventajas económicas resultantes, así como su bajo impacto ambiental, tanto en su producción como en su transformación, añadiéndose a lo anterior el hecho comprobado que el bambú puede ser producido localmente a gran escala, se cumplen los objetivos establecidos y se comprueba la hipótesis de que es factible y viable el desarrollo de un sistema de techumbre hecho con bambú, adecuado para la localidad, dada la disponibilidad, resistencia, ligereza, economía en producción y bajo impacto ambiental de este material, llevándose este desarrollo de un modo eficiente, seguro e independiente de la industria de la construcción local y nacional.

5.7 RECOMENDACIONES

Considerando los alcances de la presente investigación, se hace necesaria la recomendación y consideración de diversos aspectos que deberán ser abundados y/o investigados posteriormente, en relación a su importancia en cuanto al Sistema de Techumbre desarrollado y en cuanto uso del bambú como un nuevo material constructivo en la región, así como en las repercusiones ecológicas y sociales que de esto pudieran derivar.

En este sentido, se recomienda llevar a cabo pruebas mecánicas más numerosas y específicas al bambú *dendrocalamus strictus*, tales como torsión, compresión y tensión perpendicular a las fibras, así como estudios más específicos de la durabilidad para su uso en la vivienda, pues si bien la durabilidad comprobada en este trabajo se estableció en 15 años, ésta pudiera ser mayor, considerando que existen construcciones con bambú que superan este tiempo.

Así mismo, se recomienda que las pruebas mecánicas se realicen a partir normas establecidas empleando probetas normalizadas, de modo que las diferencias obtenidas en los resultados (como las observadas en los módulos de elasticidad de tensión, compresión y flexión) puedan ser explicadas y comparadas con los resultados de otros autores a partir de parámetros semejantes.

Por otro lado, si bien el bambú puede ser considerado un material que ofrece aislamiento térmico, se recomienda hacer estudios de conductividad térmica, tanto al bambú como material, como a elementos de cubrición empleados en la vivienda (muros y cubiertas), así como estudios de confort térmico, considerando en estos casos, diversas opciones de recubrimientos aislantes.

En adición a lo anterior, se recomienda analizar el comportamiento y la durabilidad a la intemperie del sistema desarrollado, con distintos tipos de elementos impermeables.

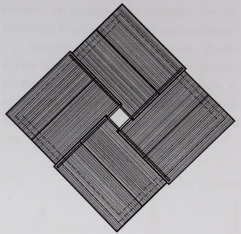
Como parte complementaria a este trabajo en particular, se recomienda la aplicación de la membrana impermeable a base de tela de manta con barniz de poliestireno reciclado (descrita en el Anexo 2), así como su estudio y análisis de aplicabilidad, comportamiento a la intemperie, y facilidad de ser retirado en caso de que el Sistema de techumbre requiera ser desmontado. Paralelamente se recomienda el análisis y la aplicación de distintos tipos de elementos impermeables que puedan ser colocados encima de los paneles de bambú, o incluso considerar el sustituirlos por algún otro elemento, según las necesidades y posibilidades económicas de los posibles usuarios.

En cuanto al proceso constructivo del Sistema de Techumbre de Bambú, se recomienda la experimentación con otros sistemas de unión u otros elementos de bambú (con sus respectivas pruebas mecánicas) para evitar el empleo del acero, cuya oxidación pudiera implicar la necesidad de mantenimiento a mediano plazo.

A escala general, se recomienda el estudio y desarrollo de otros elementos constructivos a base de bambú que puedan ser implementados en el desarrollo de vivienda autogestionada.

Finalmente, dado que la implementación o adopción del Sistema de Techumbre Bambú requeriría de una mayor accesibilidad a este material, y a pesar de que su factibilidad de cultivo está demostrada, se recomienda ampliamente la investigación multidisciplinaria del cultivo del bambú en el estado de Yucatán, pues si bien su uso implicaría un beneficio en el desarrollo de vivienda, no debe dejarse de considerar su viabilidad

ecológica, económica y social, dado que no es una especie endémica de la región, y actualmente no existe un desarrollo a gran escala de tal modo que temas como el cultivo, la cosecha, el transporte, el mecanizado, e incluso la existencia de cultivos a pequeña escala, habrán de ser planeados buscando en todo momento los mayores beneficios medioambientales y sociales.



ANEXO 1

Pruebas mecánicas al bambú

ANEXO 1
PRUEBAS MECÁNICAS AL BAMBÚ

Resumen

En este documento se presentan los resultados de las pruebas de esfuerzo a compresión, tensión y flexión, así como módulos de elasticidad (compresión y tensión) y momentos máximos (flexión) con fines investigativos, para especímenes experimentales de la especie de bambú d*endrocalamus strictu*s cosechadas en la hacienda Xixim, en el municipio de Muna, Yucatán, siguiendo los criterios para pruebas mecánicas básicas (Imagen A1.1), empleando para ello una prensa universal con capacidad de 60 toneladas.

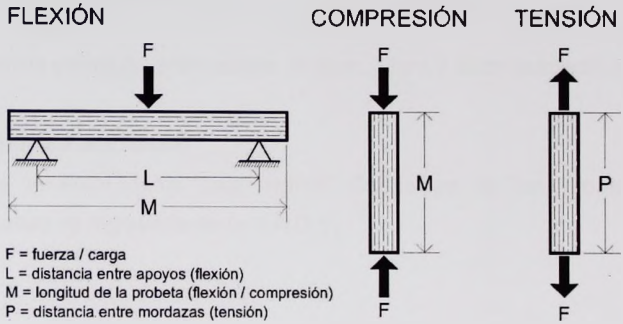


Imagen A1.1 Esquemas de Flexión, Compresión y Tensión

Dibujo: Carlos Uribe

Objetivo

Considerando al bambú como un recurso natural renovable adecuado para el desarrollo sustentable, al representar una alternativa constructiva ecológica y económica frente al uso de la madera y de materiales no renovables, el objetivo de este trabajo se enfoca en conocer la factibilidad

del uso del bambú, particularmente de la especie *dendrocalamus strictus*, para la construcción de elementos aplicables a vivienda, tales como estructuras, techumbre, muros y cercas, a partir de los resultados obtenidos en relación a sus cualidades mecánicas, comparándolos con las de otros materiales existentes y considerando su aplicación directa en fórmulas para el diseño de estructuras y/o elementos constructivos.

Descripción de los objetos presentes (Imágenes A1.2 – A1.6)

- Cañas de bambú de la especie *dendrocalamus strictus* (tres piezas), con longitudes de 1.80 m, 2.44 m y 2.43 m.

- Radios de curvatura aproximado: 27m, 37m y 8.5m + 9.15m (pieza irregular) respectivamente.

- Distancia promedio entre nudos: 34.4cm, 31cm y 30cm respectivamente.

Herramienta empleada

Prensa universal Marca "Satel Instron". Capacidad: 60 Ton, propiedad de la Facultad de Ingeniería de la U.A.D.Y.

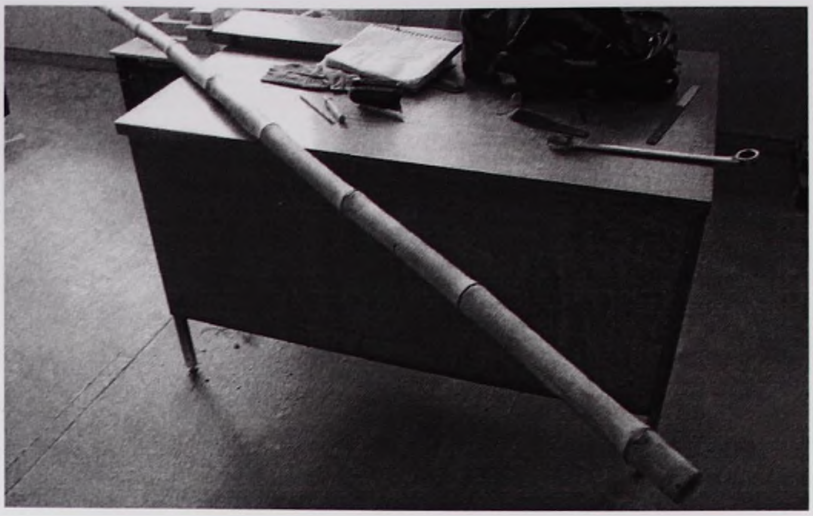


Imagen A1.2 Caña de bambú, pieza No.3. Fotografía: Carlos Uribe

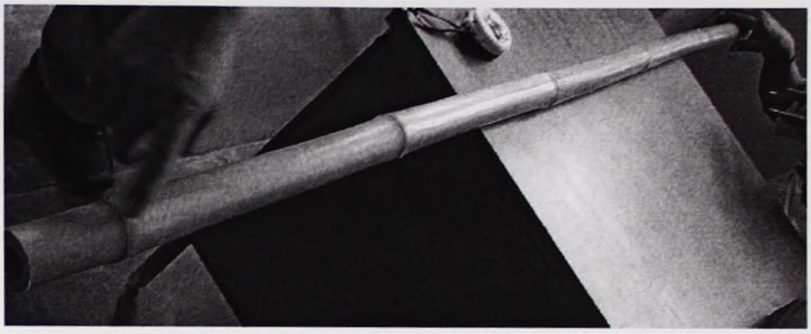


Imagen A1.3 Caña de bambú, pieza No.1. Fotografía: Carlos Uribe

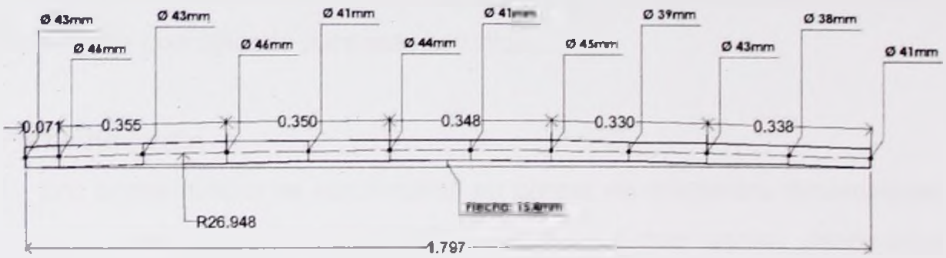


Imagen A1.4 Caña de bambú, pieza No.1

Dibujo: Carlos Uribe

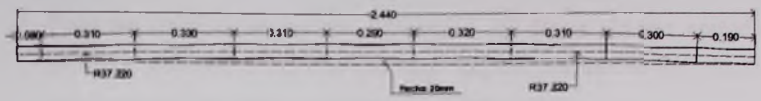


Imagen A1.5 Caña de bambú, pieza No.2

Dibujo: Carlos Uribe

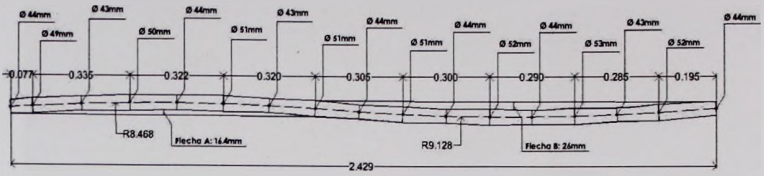


Imagen A1.6 Caña de bambú, pieza No.3

Dibujo: Carlos Uribe

Notas

- Los especímenes de bambú empleadas fueron previamente tratadas con una mezcla de Diesel reciclado y Sellador.

- La edad de los especímenes se estima entre 3 y 4 años.

- Los números inscritos en las probetas corresponden únicamente al orden en que fueron realizadas. En algunos casos no corresponderán al número de probeta cuantificada para este estudio.

Procedimiento:

1. Los especímenes se seccionaron en piezas de diferentes dimensiones y formas (probetas) según la prueba a la que serían destinados (Imagen A1.7).

2. Para las pruebas de compresión paralela a las fibras y flexión, fueron consideradas piezas con y sin nudos intermedios.

3. Para las pruebas de tensión paralela a las fibras, fueron cortadas probetas con dos secciones distintas: segmentos de corona circular (semi-cuartos de caña), y secciones rectangulares.

Imagen A1.7 Obtención de probetas

Fotografía: Carlos Uribe

Cálculos

El cálculo del esfuerzo de compresión paralela a la fibra se obtuvo mediante la fórmula:

$$\sigma_{c\parallel} = \frac{P}{A_n}$$

En donde:

$\sigma_{c\parallel}$ = Esfuerzo de compresión paralela

P = Carga soportada por la probeta (o fuerza de compresión)

A_n = Área neta de la sección

El cálculo del esfuerzo de tensión paralela a la fibra se obtuvo mediante la fórmula:

$$\sigma_{t\parallel} = \frac{T}{A_n}$$

En donde:

$\sigma_{t\parallel}$ = Esfuerzo de tensión paralela

T = Carga soportada por la probeta (o fuerza de tensión)

A_n = Área neta de la sección

En cada uno de los casos, la Desviación Estándar fue calculada mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x - \bar{x})}{n - 1}}$$

En donde:

σ = Desviación Estándar

x = cada uno de los valores de las pruebas

$\bar{x}$ = Promedio de las pruebas (media)

n = Número de especímenes probados

Para el cálculo del Momento Máximo en las pruebas de flexión a las cañas semicilíndricas de bambú, la fórmula empleada fue la siguiente:

$$M_{max} = \frac{PL}{4}$$

En donde:

M_{max} = Momento máximo

P = Carga máxima soportada por la probeta

L = Distancia entre apoyos

Para el cálculo del Esfuerzo Máximo (o resistencia) en las pruebas de flexión a las cañas semicilíndricas de bambú, la fórmula empleada fue la siguiente:

$$\sigma = \frac{(4M)(Re)}{\pi(Re^4 - Ri^4)}$$

En donde:

σ = Esfuerzo máximo

M = Momento máximo

Re = Radio exterior

Ri = Radio interior

El cálculo del Módulo de Elasticidad en las pruebas de flexión a las cañas semicilíndricas de bambú se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$E = \frac{64M}{\emptyset\pi(De^4 - Di^4)}$$

En donde:

E = Módulo de Eslasticidad

M = Momento máximo

$\emptyset$ = Curvatura

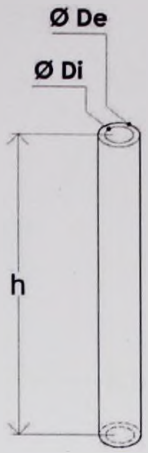
De = Diámetro exterior

Di = Diámetro interior

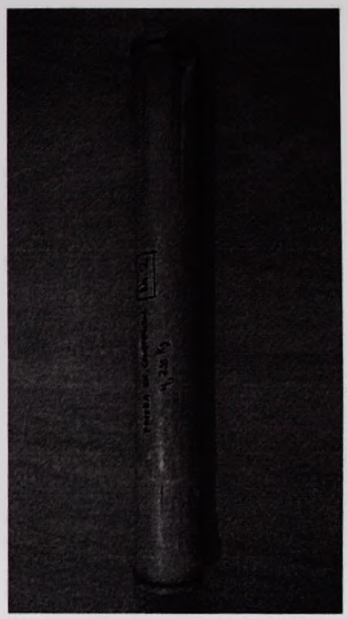
Es importante aclarar que si bien el símbolo "σ" se emplea en dos fórmulas, éste pertenece a dos conceptos muy distintos; el primero se refiere a la Desviación estándar, medida empleada en la Estadística descriptiva, mientras que el segundo se refiere al Esfuerzo máximo, empleado en Física.

PRUEBAS DE COMPRESIÓN

Compresión (prueba No.1)



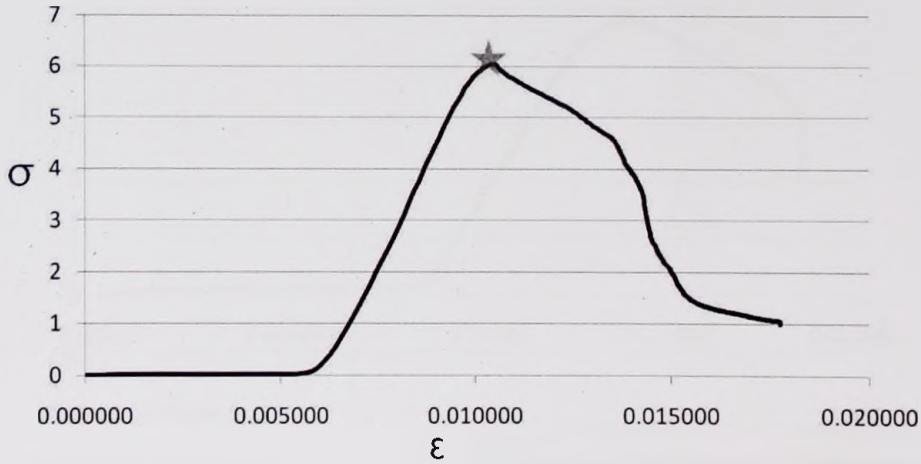
Vel. De deformación
= 2.27 mm/min
As: Con nudo.
Al: Con nudo.
h = 365 mm
De = 40 mm
Di = 27 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 6.84cm²
Carga soportada por la probeta :
4,142 kg



Esfuerzo de Compresión: 605.55 kg/cm²

Compresión (prueba No.1)

Comportamiento del esfuerzo de compresión ejercido por la probeta:



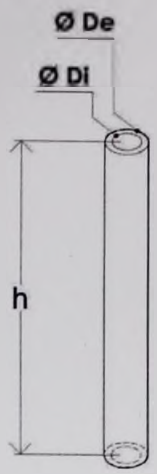
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

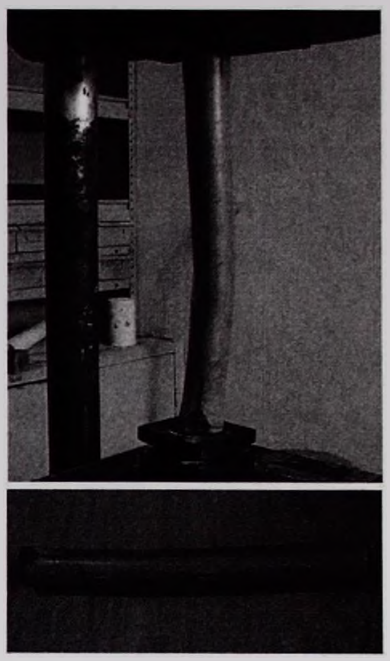
Módulo de Elasticidad: **1,552.3 kg/mm²**

★ **Esfuerzo de Compresión: 605.55 kg/cm²**

Compresión (prueba No.2)



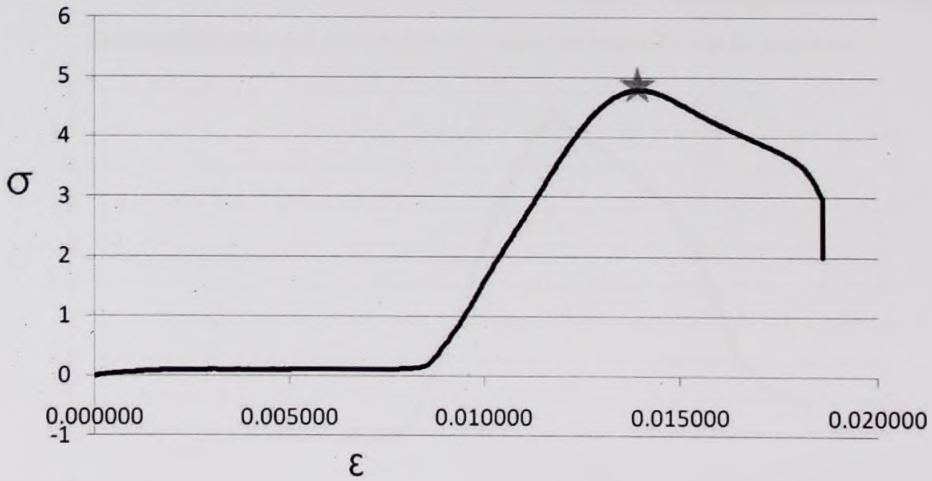
Vel. De deformación
= 2.27 mm/min
As: Con nudo.
Al: Con nudo.
h = 342 mm
De = 38 mm
Di = 25 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 6.43cm²
Carga soportada por la probeta:
3,080 kg



Esfuerzo de Compresión: 479.00 kg/cm²

Compresión (prueba No.2)

Comportamiento del esfuerzo de compresión ejercido por la probeta:



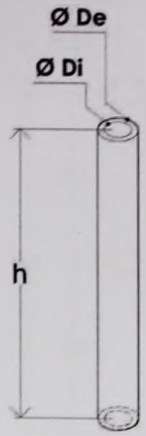
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

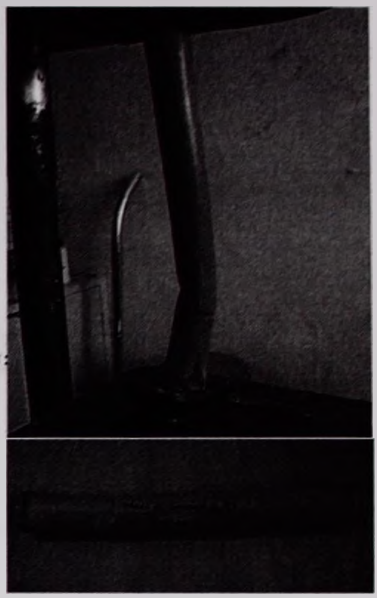
Módulo de Elasticidad: **1,046.4 kg/mm²**

★ **Esfuerzo de Compresión: 479.00 kg/cm²**

Compresión (prueba No.3)



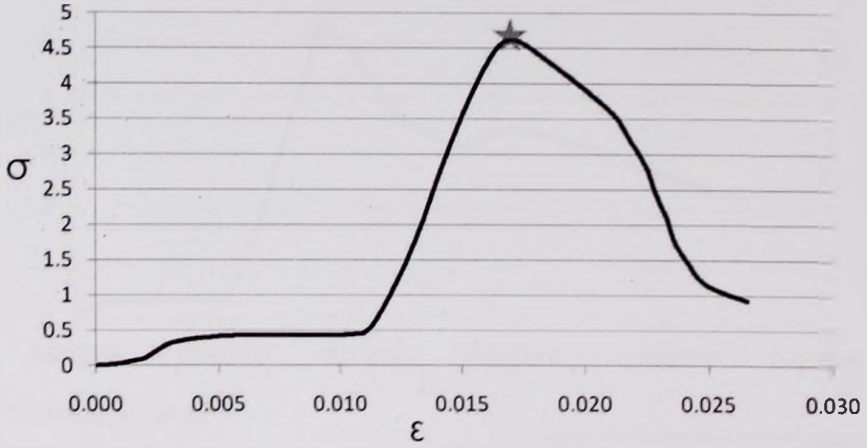
Vel. De deformación
= 2.27 mm/min
As: Con nudo.
Al: Con nudo.
h = 355 mm
De = 41 mm
Di = 26 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 7.90cm²
Carga soportada por la probeta:
3,650 kg



Esfuerzo de Compresión: 462.02 kg/cm²

Compresión (prueba No.3)

Comportamiento del esfuerzo de compresión ejercido por la probeta:



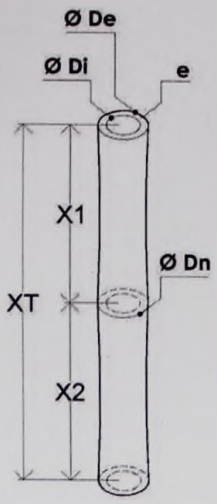
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

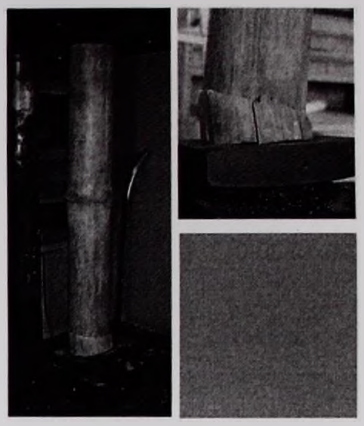
Módulo de Elasticidad: **854.2 kg/mm²**

★ **Esfuerzo de Compresión: 462.02 kg/cm²**

Compresión (prueba No.4)



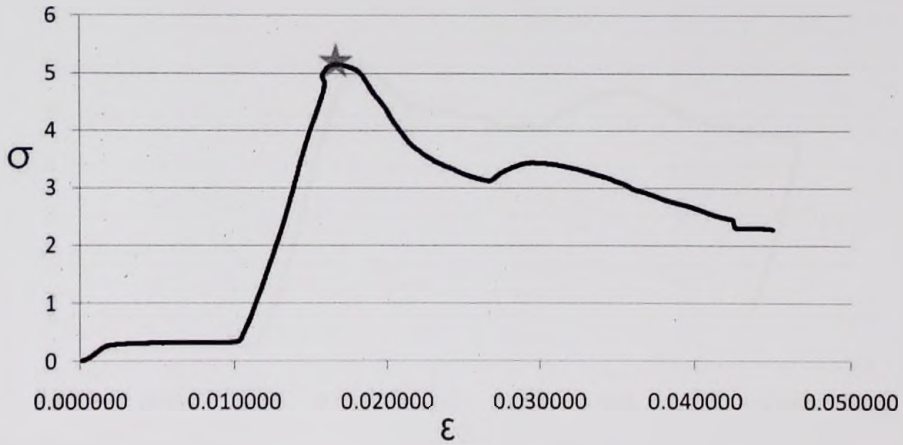
Vel. De deformación
= 2,65 - 3 mm/min
XT = 332 mm
X1 = 181 mm
X2 = 150 mm
De = 46 mm
Di = 27 mm
Dn = 50 mm
Espesor de pared (e) = 9 mm
Área de la sección = 10.89 cm²
Carga soportada por la probeta:
5,612 kg



Esfuerzo de Compresión: 515.33 kg/cm²

Compresión (prueba No.4)

Comportamiento del esfuerzo de compresión ejercido por la probeta:



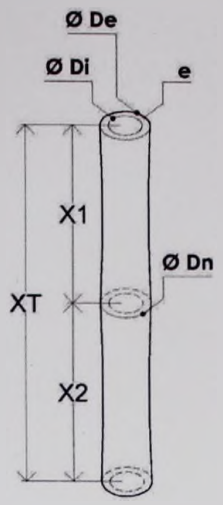
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

Módulo de Elasticidad: **854.54 kg/mm²**

★ **Esfuerzo de Compresión: 515.33 kg/cm²**

Compresión (prueba No.5)



Vel. De deformación = 2.65 - 3 mm/min

XT = 303 mm

X1 = 142 mm

X2 = 1,161 mm

De = 44 mm

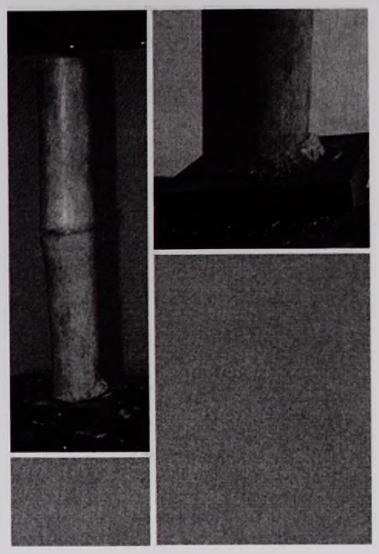
Di = 28 mm

Dn = 50 mm

Espesor de pared (e) = 8.5 mm

Área de la sección = 9.05 cm²

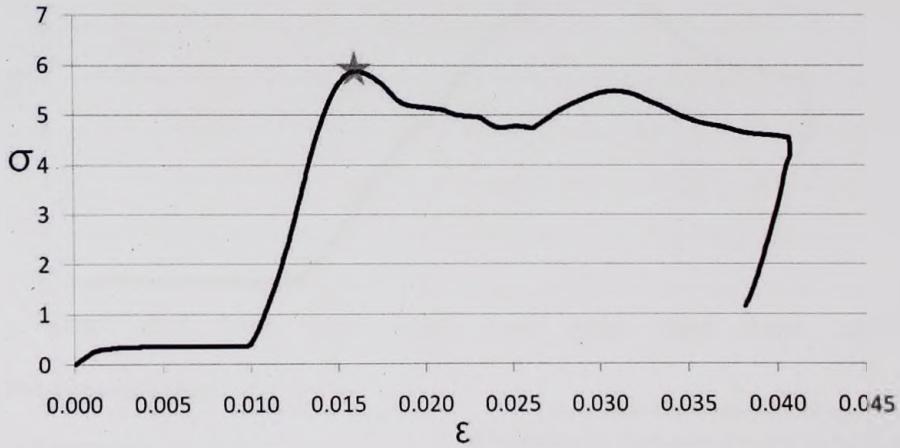
Carga soportada por la probeta: 5,347 kg



Esfuerzo de Compresión: 590.82 kg/cm²

Compresión (prueba No.5)

Comportamiento del esfuerzo de compresión ejercido por la probeta:



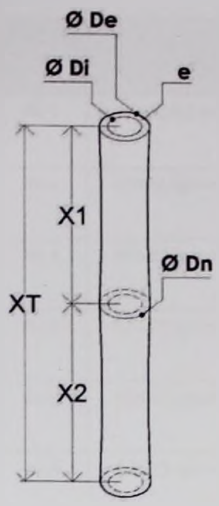
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

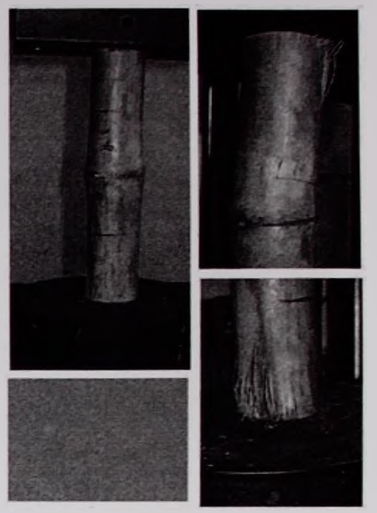
Módulo de Elasticidad: **1,182.9 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Compresión: 590.82 kg/cm²**

Compresión (prueba No.6)



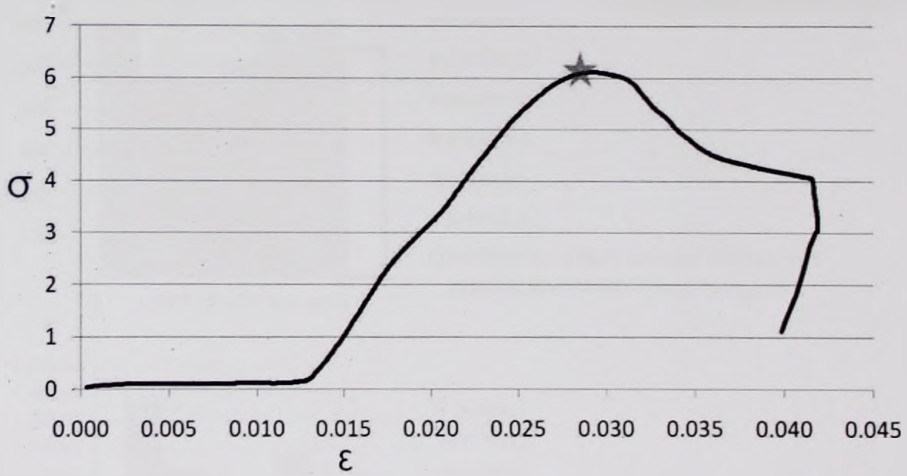
Vel. De deformación
= 2.65 - 3 mm/min
XT = 205 mm
X1 = 108 mm
X2 = 97 mm
De = 43 mm
Di = 27 mm
Dn = 50 mm
Espesor de pared (e) = 8 mm
Área de la sección = 8.80 cm²
Carga soportada por la probeta: 5,378 kg



Esfuerzo de Compresión: 611.13 kg/cm²

Compresión (prueba No.6)

Comportamiento del esfuerzo de compresión ejercido por la probeta:



σ = Esfuerzo en Kg/mm²

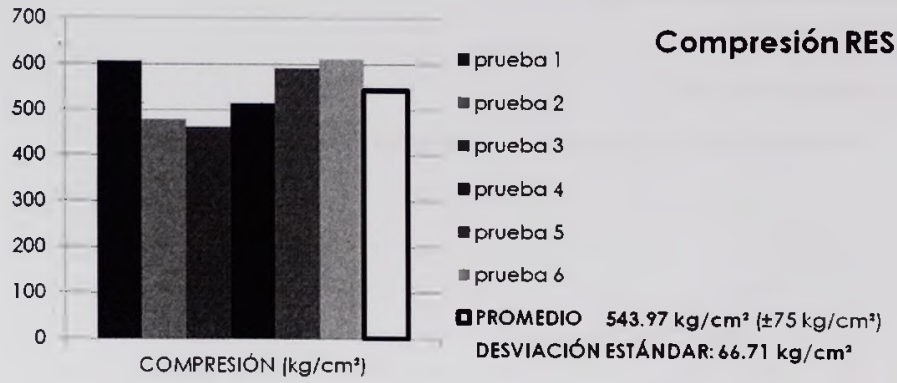
ε = Deformación en mm/mm

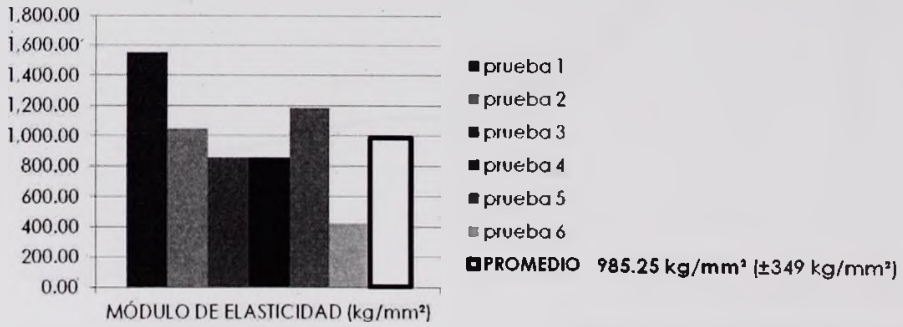
Módulo de Elasticidad: **421.29 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Compresión: 611.13 kg/cm²**

Compresión RESUMEN.

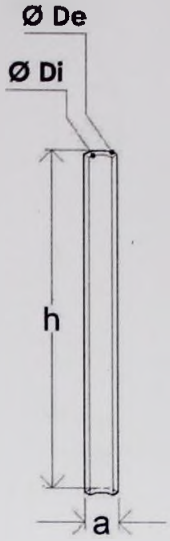
Prueba	Esfuerzo de Compresión	Módulo de Elasticidad.	Dimensiones de la probeta	Área de la sección	Notas.
No.1	605.55 kg/cm²	1,552.3 kg/mm²	Ø40mm, Ø27mm, 365mm	6.84cm²	Con nudo en los extremos.
No.2	479.00 kg/cm²	1,046.4 kg/mm²	Ø38mm, Ø25mm, 342mm	6.43cm²	Con nudo en los extremos.
No.3	462.02 kg/cm²	854.2 kg/mm²	Ø41mm, Ø26mm, 355mm	7.90cm²	Con nudo en los extremos.
No.4	515.33 kg/cm²	854.54 kg/mm²	Ø46mm, Ø27mm, 332mm	10.89cm²	Con nudo central
No.5	590.82 kg/cm²	1,182.9 kg/mm²	Ø44mm, Ø28mm, 303mm	9.05cm²	Con nudo central
No.6	611.13 kg/cm²	421.29 kg/mm²	Ø43mm, Ø27mm, 205mm	8.80cm²	Con nudo central
PROM.	**543.97 kg/cm²** (±75 kg/cm²)	**985.27 kg/mm²** (±349kg/mm²)			
D.E	**66.71 kg/cm²**				



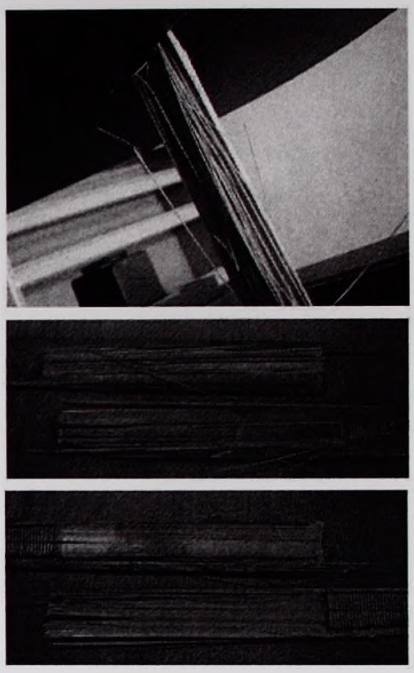


PRUEBAS DE TENSIÓN.

Tensión (prueba No.1)



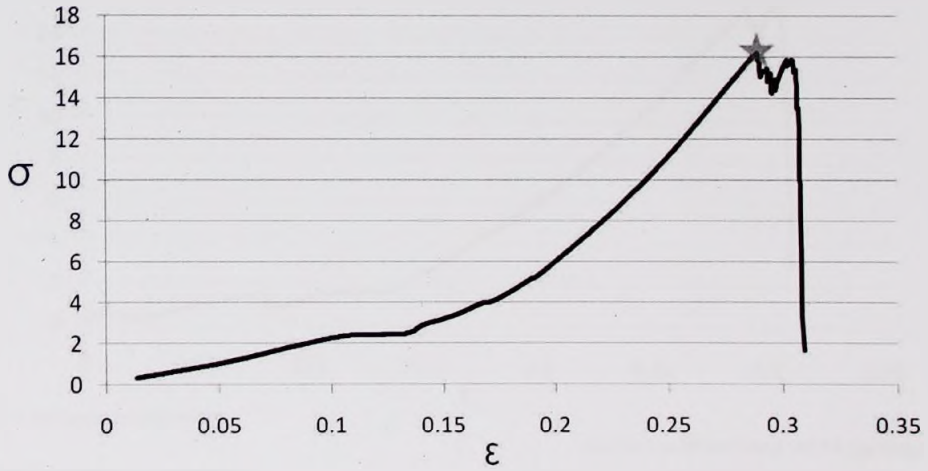
Vel. De deformación
= 2.65 - 3 mm/min
h = 315 mm
a = 22.5 mm
De = 40 mm
Di = 26 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 1.38cm²
Carga soportada por la probeta : 2,239 kg



Esfuerzo de Tensión: 1,622.46 kg/cm²

Tensión (prueba No.1)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



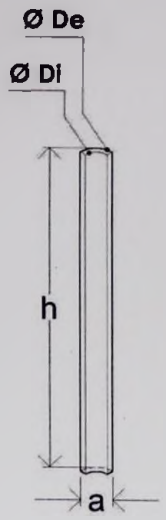
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

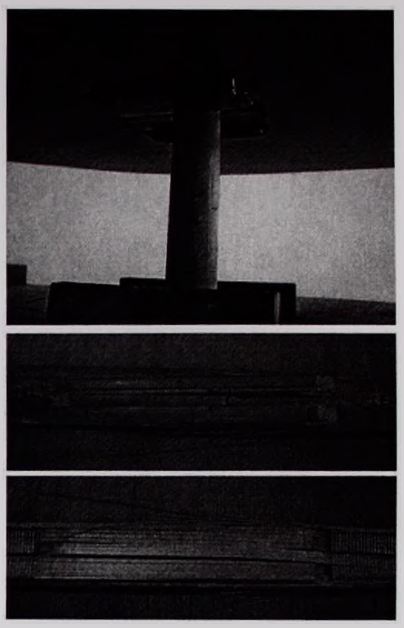
Módulo de Elasticidad: **101.14 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Tensión: 1,622.46 kg/cm²**

Tensión (prueba No.2)



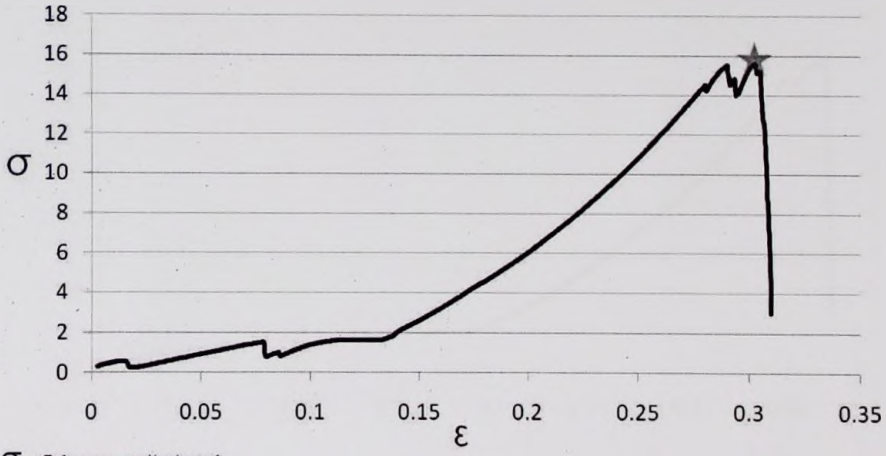
Vel. De deformación
= 6.8 - 7 mm/min
h = 315 mm
a = 26.5 mm
De = 40 mm
Di = 26 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 1.67cm²
Carga soportada por la probeta: 2,611 kg



Esfuerzo de Tensión: 1,563.47 kg/cm²

Tensión (prueba No.2)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



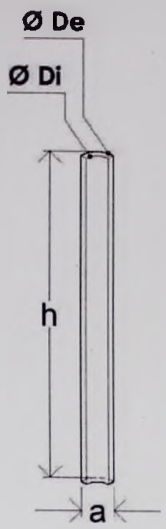
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

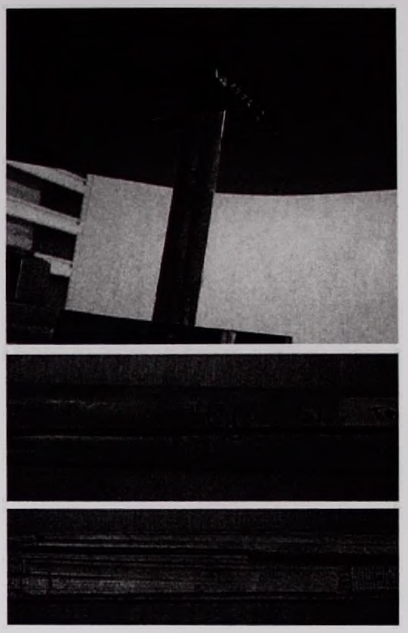
Módulo de Elasticidad: **83.95 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Tensión: 1,563.47 kg/cm²**

Tensión (prueba No.3)



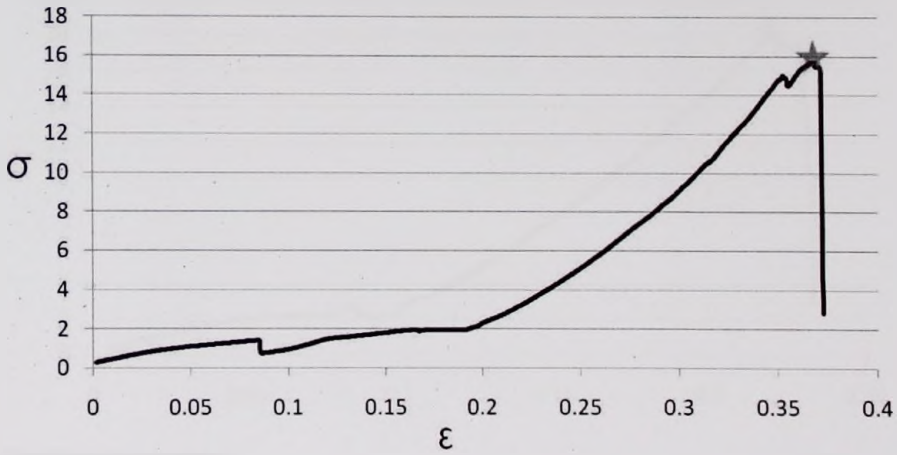
Vel. De deformación
= 6.8 - 7 mm/min
h = 315 mm
a = 27.5 mm
De = 40 mm
DI = 26 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 1.75cm²
Carga soportada por la probeta: 2,749 kg



Esfuerzo de Tensión: 1,570.85 kg/cm²

Tensión (prueba No.3)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



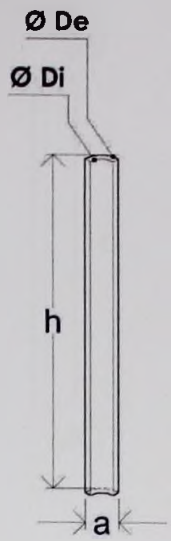
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

Módulo de Elasticidad: **79.43 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Tensión: 1,570.85 kg/cm²**

Tensión (prueba No.4)

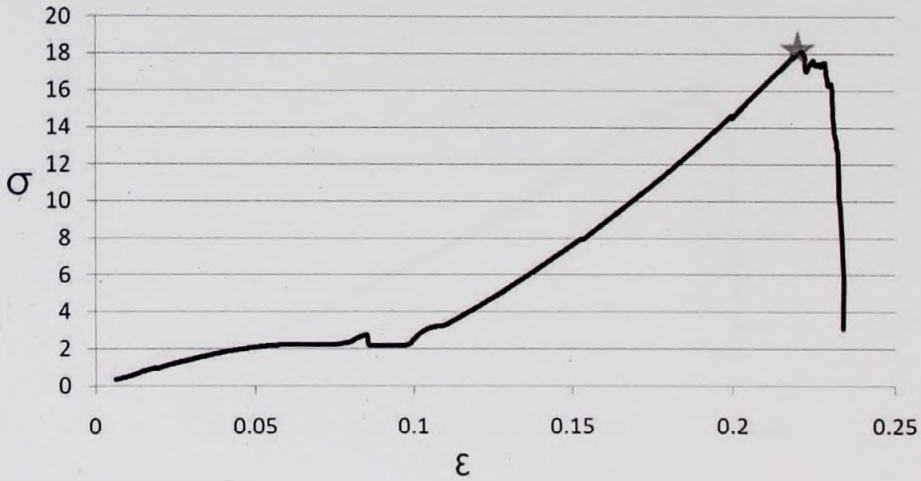


Vel. De deformación
= 6.8 - 7 mm/min
h = 315 mm
a = 22.5 mm
De = 40 mm
Di = 26 mm
Espesor de pared = 6.5 mm
Área de la sección = 1.38cm²
Carga soportada por la probeta: 2,506 kg

Esfuerzo de Tensión: 1,815.94 kg/cm²

Tensión (prueba No.4)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



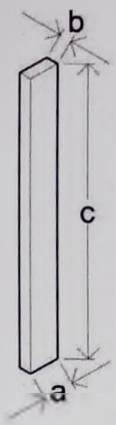
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

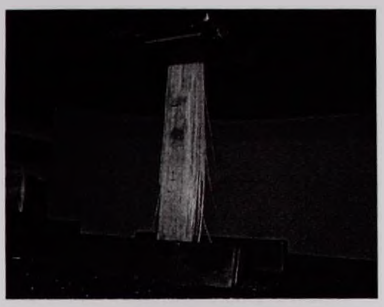
Módulo de Elasticidad: **131.77 kg/mm²**

★ **Esfuerzo de Tensión: 1,815.94 kg/cm²**

Tensión (prueba No.5)



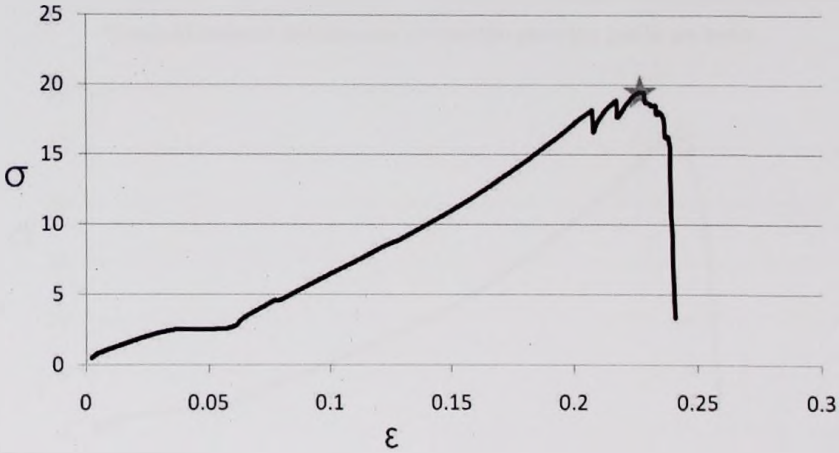
Vel. De deformación
= 6 - 7 mm/min
a = 13 mm
b = 8 mm
c = 290 mm
Área de la sección = 1.04 cm²
Carga soportada por la probeta : 2,023 kg



Esfuerzo de Tensión: 1,945.19 kg/cm²

Tensión (prueba No.5)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



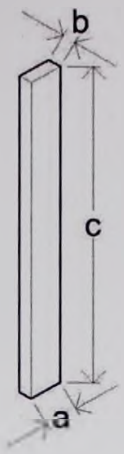
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

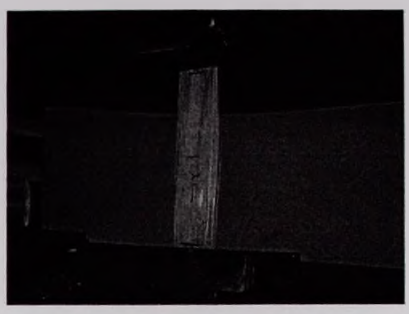
Módulo de Elasticidad: **97.16 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Tensión: 1.945.19 kg/cm²**

Tensión (prueba No.6)



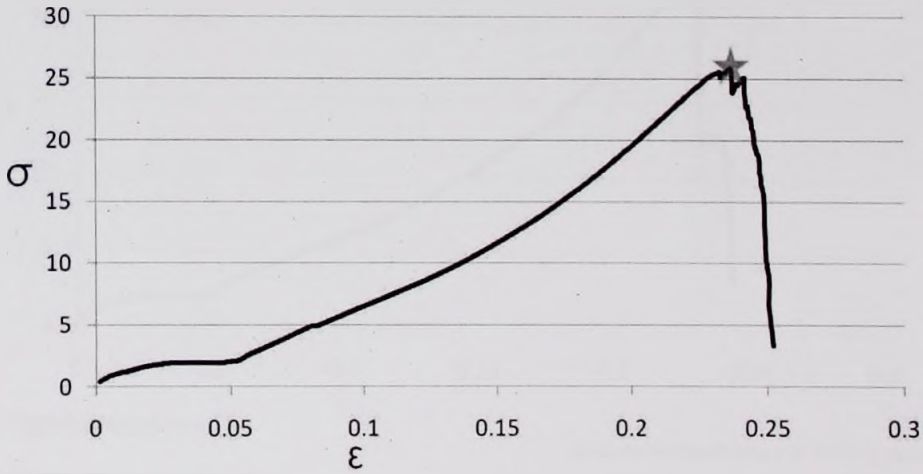
Vel. De deformación
= 6 - 7 mm/min
a = 20 mm
b = 7 mm
c = 292 mm
Área de la sección = 1.40 cm²
Carga soportada por la probeta: 3,625 kg



Esfuerzo de Tensión: 2,589.28 kg/cm²

Tensión (prueba No.6)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

Módulo de Elasticidad: **123 kg/mm²**

★ **Esfuerzo de Tensión: 2,589.28 kg/cm²**

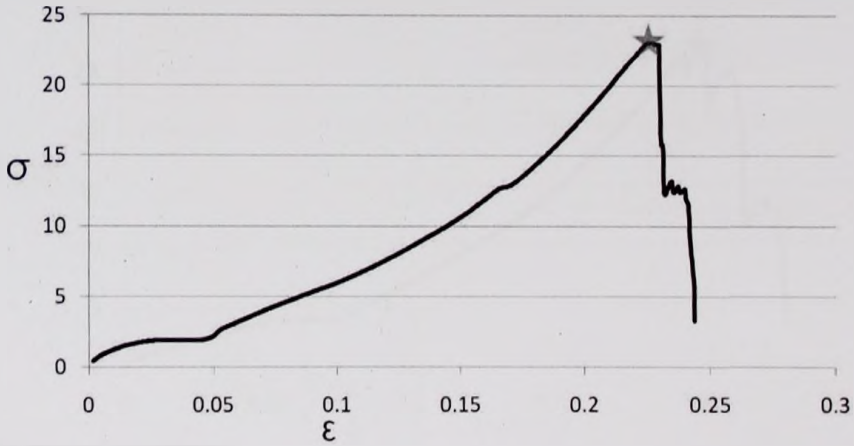
Tensión (prueba No.7)

Vel. De deformación
= 6 - 7 mm/min
a = 18 mm
b = 7 mm
c = 296 mm
Área de la sección = 1.26 cm²
Carga soportada por la probeta : 2,913 kg

Esfuerzo de Tensión: 2,311.90 kg/cm²

Tensión (prueba No.7)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



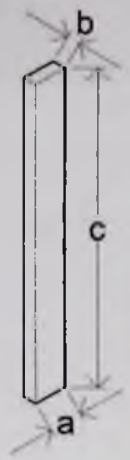
σ = Esfuerzo en Kg/mm²

ε = Deformación en mm/mm

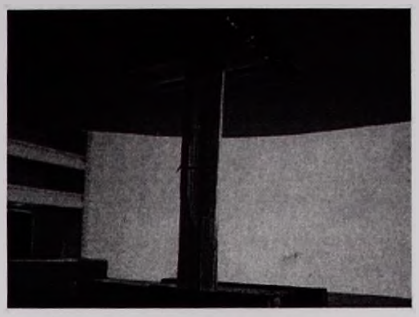
Módulo de Elasticidad: **115.57 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Tensión: 2,311.90 kg/cm²**

Tensión (prueba No.8)



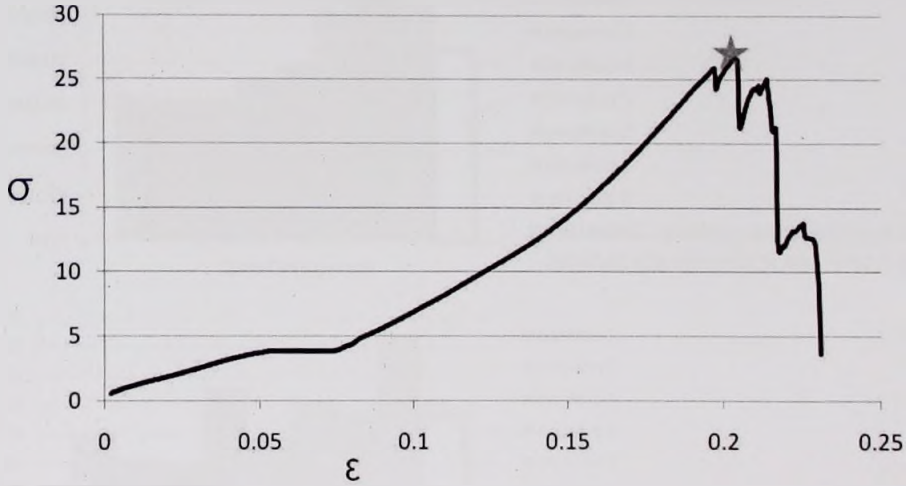
Vel. De deformación
= 6 - 7 mm/min
a = 18 mm
b = 5 mm
c = 290 mm
Área de la sección = 0.90 cm²
Carga soportada por la probeta: 2,400 kg



Esfuerzo de Tensión: 2,666.66 kg/cm²

Tensión (prueba No.8)

Comportamiento del esfuerzo de tensión ejercido por la probeta:



σ = Esfuerzo en Kg/mm²

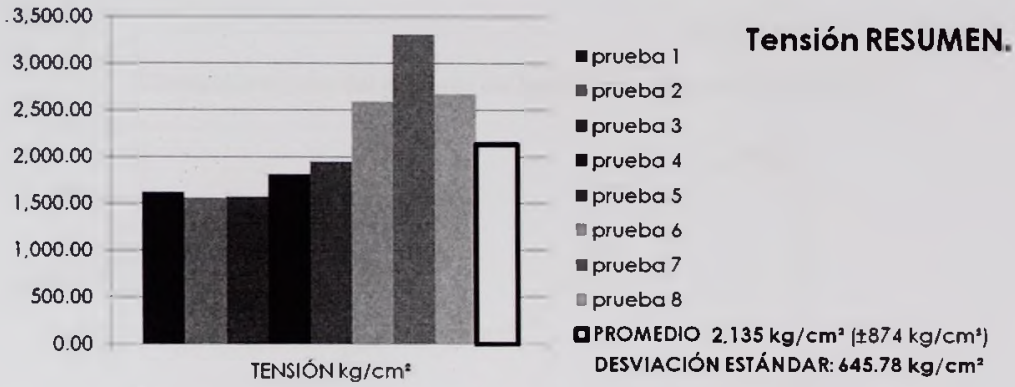
ε = Deformación en mm/mm

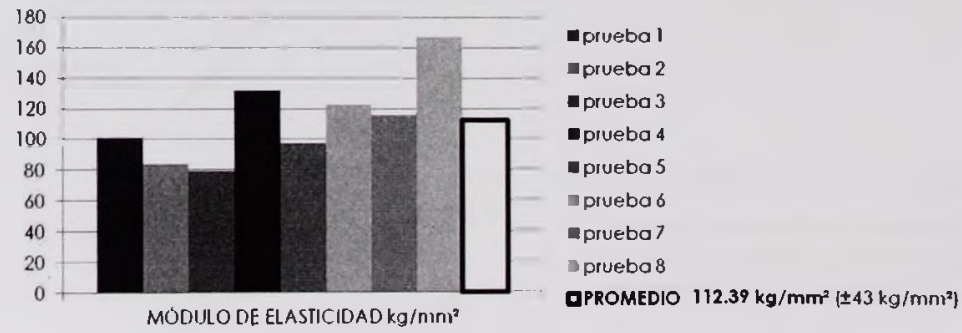
Módulo de Elasticidad: **167.14 kg/mm²**

★**Esfuerzo de Tensión: 2,666.66 kg/cm²**

Tensión RESUMEN.

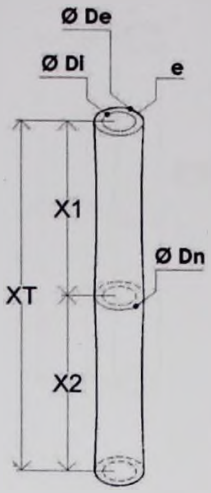
Prueba	Esfuerzo de Tensión.	Módulo de elasticidad.	Dimensiones de la probeta	Área de la sección	Notas.
No.1	1,622.46 kg/cm²	101.14 kg/mm²	Ø40mm, Ø26mm, 22.5mm, 315mm	1.38cm²	Probeta irregular.
No.2	1,563.47 kg/cm²	83.95 kg/mm²	Ø40mm, Ø26mm, 26.5mm, 315mm	1.67cm²	Probeta irregular.
No.3	1,570.85 kg/cm²	79.43 kg/mm²	Ø40mm, Ø26mm, 27.5mm, 315mm	1.75cm²	Probeta irregular.
No.4	1,815.94 kg/cm²	131.77 kg/mm²	Ø40mm, Ø26mm, 22.5mm, 315mm	1.38cm²	Probeta irregular.
No.5	1,945.19 kg/cm²	97.16 kg/mm²	13 mm, 8 mm, 290 mm	1.04 cm²	Probeta regular.
No.6	2,589.28 kg/cm²	123 kg/mm²	20 mm, 7 mm, 292 mm	1.40 cm²	Probeta regular.
No.7	3,311.90 kg/cm²	115.57 kg/mm²	18 mm, 7 mm, 296 mm	1.26 cm²	Probeta regular.
No.8	2,666.66 kg/cm²	167.14 kg/mm²	18 mm, 5 mm, 290 mm	0.90 cm²	Probeta regular.
PROM.	**2,135.71 kg/cm²** (±874kg/cm²)	**112.39 kg/mm²** (±43 kg/mm²)			
D.E	**645.78 kg/cm²**				



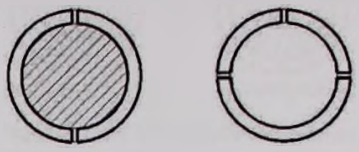


PRUEBAS DE FLEXIÓN.

Flexión (prueba No.1)

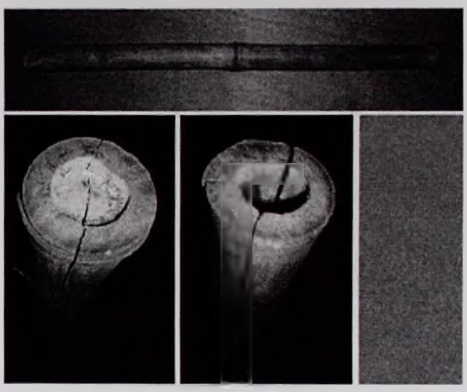


Vel. De deformación = 3 mm/min
XT = 647 mm
X1 = 320 mm
X2 = 326 mm
De = 40 mm
DI = 24 mm
Dn = 44 mm
Distancia entre apoyos: 400 mm
Espesor de pared (e) = 8 mm
Área de la sección = 8.04 cm²
Carga soportada por la probeta: 565.00 kg



Extremo con "tapa" Extremo sin "tapa"

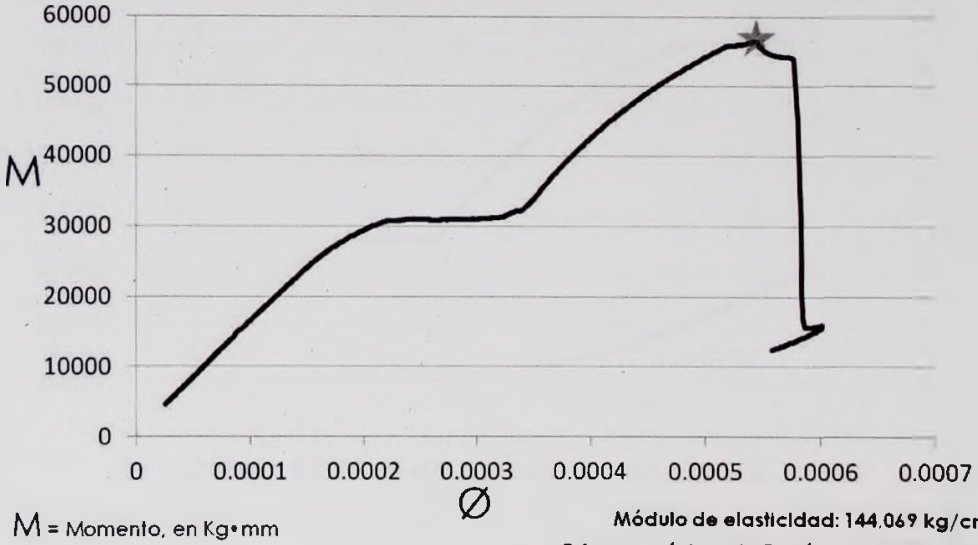
Esquemas de falla desde los extremos hacia casi toda la longitud de la probeta.



Momento máximo: 56,500 Kg•mm

Flexión (prueba No.1)

Comportamiento del esfuerzo de flexión ejercido por la probeta:

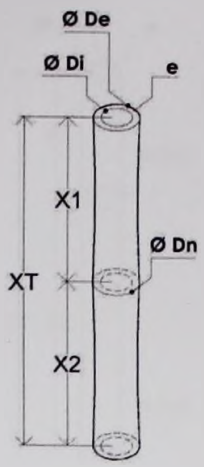


M = Momento, en Kg•mm

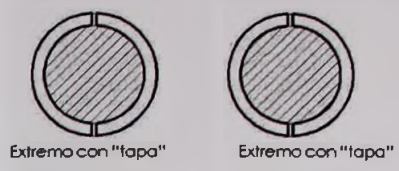
Ø = Curvatura, en mm⁻¹

Módulo de elasticidad: 144,069 kg/cm²
Esfuerzo máximo de flexión: 1,033.11 kg/cm²
★ **Momento máximo: 56,500 kg•mm (56.5 kg•m)**

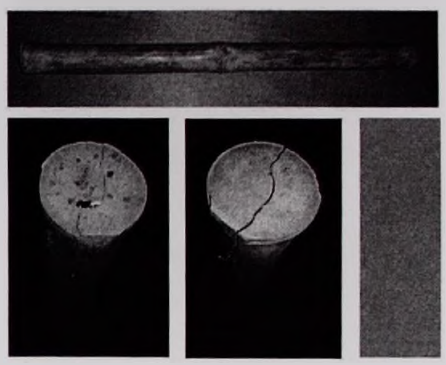
Flexión (prueba No.2)



Vel. De deformación = 3 mm/min
XT = 595 mm
X1 = 287 mm
X2 = 307 mm
De = 42 mm
Di = 26 mm
Dn = 44 mm
Distancia entre apoyos: 400 mm
Espesor de pared (e) = 8 mm
Área de la sección = 8.55 cm²
Carga soportada por la probeta: 734.00 kg



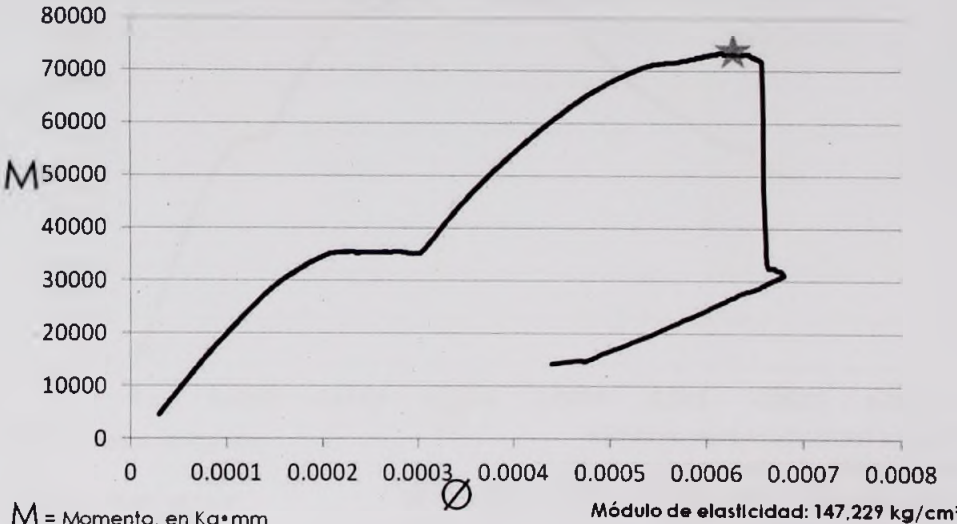
Esquemas de falla desde los extremos hacia casi toda la longitud de la probeta.



Momento máximo: 73,400 Kg•mm

Flexión (prueba No.2)

Comportamiento del esfuerzo de flexión ejercido por la probeta:



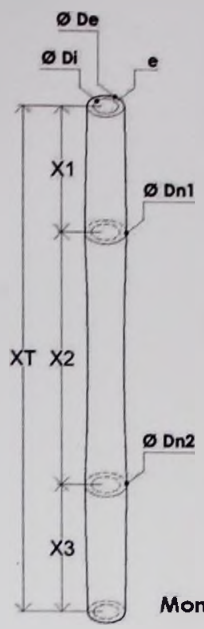
M = Momento, en Kg•mm

∅ = Curvatura, en mm⁻¹

Módulo de elasticidad: 147,229 kg/cm²
Esfuerzo máximo de flexión: 1,182.8 kg/cm²

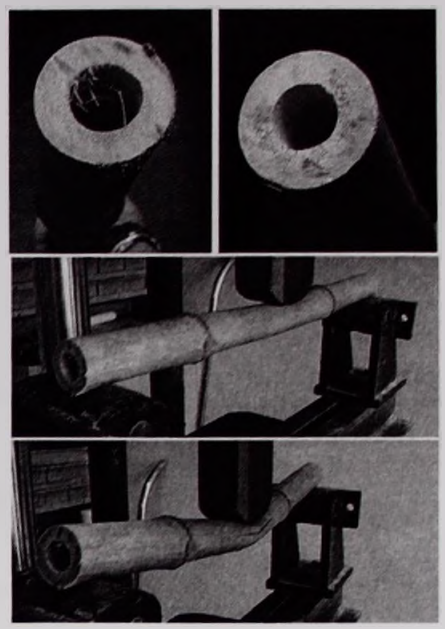
★ **Momento máximo: 73,400 kg•mm (73.4 kg•m)**

Flexión (prueba No.3)



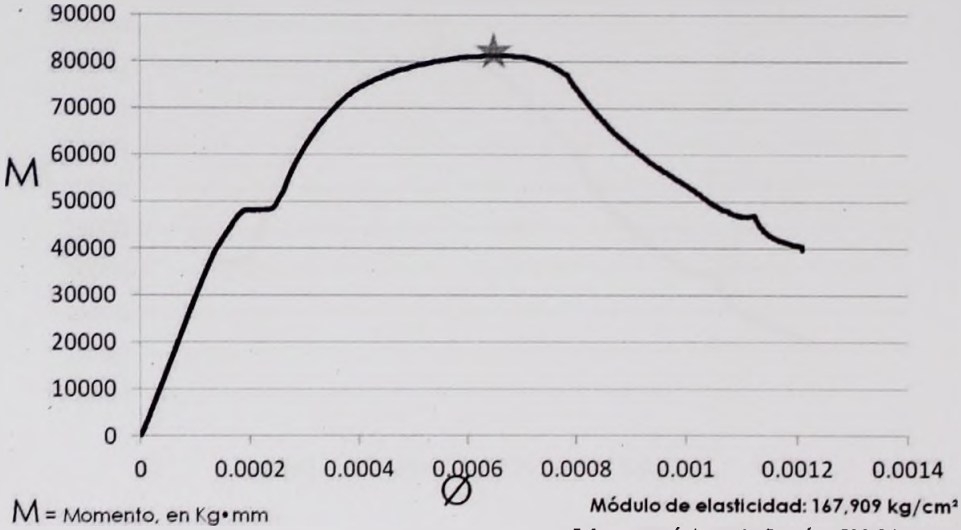
Vel. De deformación = 3 mm/min
XT = 612 mm
X1 = 190 mm
X2 = 285 mm
X3 = 137 mm
De = 44 mm
Di = 22 mm
Dn = 52 mm
Distancia entre apoyos: 560 mm
Espesor de pared (e) = 11 mm
Área de la sección = 11.4 cm²
Carga soportada por la probeta: 582.00 kg

Momento máximo: 81,480 kg•mm



Flexión (prueba No.3)

Comportamiento del esfuerzo de flexión ejercido por la probeta:



M = Momento, en Kg•mm

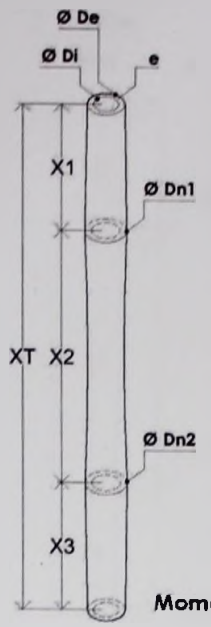
Ø = Curvatura, en mm⁻¹

Módulo de elasticidad: 167,909 kg/cm²

Esfuerzo máximo de flexión: 589.2 kg/cm²

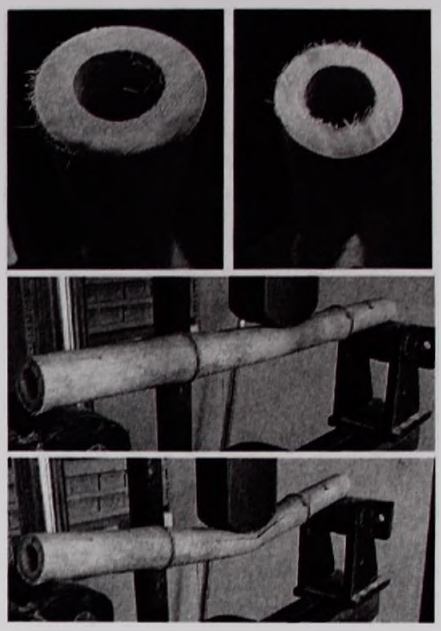
★ **Momento máximo: 81,480 kg•mm (81.48 kg•m)**

Flexión (prueba No.4)



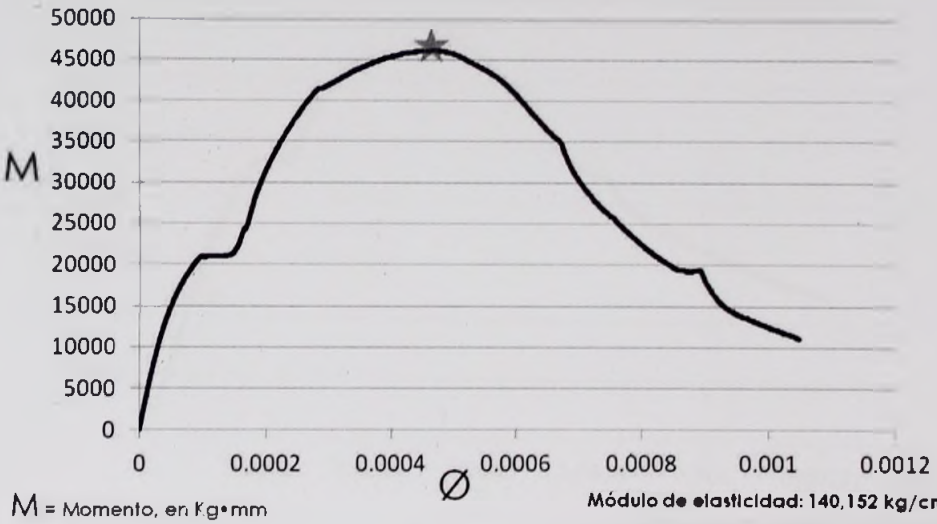
Vel. De deformación
= 3 mm/min
XT = 598 mm
X1 = 153 mm
X2 = 300 mm
X3 = 145 mm
De = 44 mm
Di = 23 mm
Dn = 52 mm
Distancia entre apoyos: 560 mm
Espesor de pared (e) = 10.5mm
Área de la sección = 11.05 cm²
Carga soportada por la probeta:
330.00 kg

Momento máximo: 46,200 kg•mm



Flexión (prueba No.4)

Comportamiento del esfuerzo de flexión ejercido por la probeta:



M = Momento, en Kg•mm

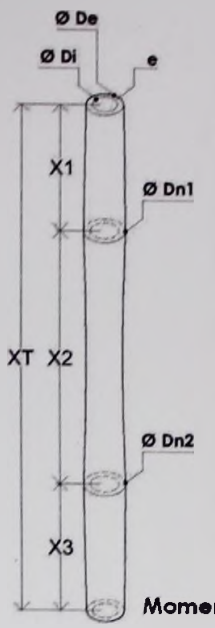
Ø = Curvatura, en mm⁻¹

Módulo de elasticidad: 140,152 kg/cm²

Esfuerzo máximo de flexión : 1,052.9 kg/cm²

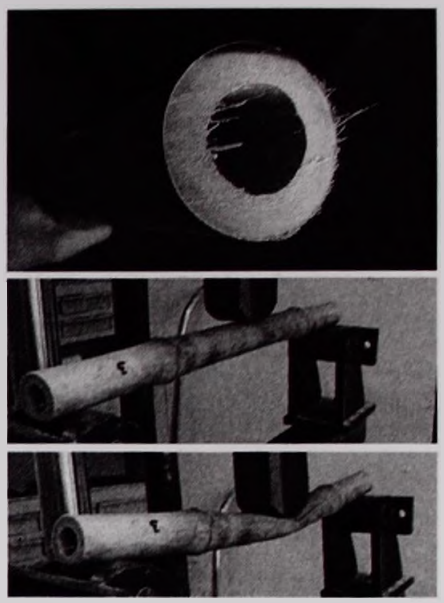
★ **Momento máximo: 46,200 kg•mm (46.20 kg•m)**

Flexión (prueba No.5)



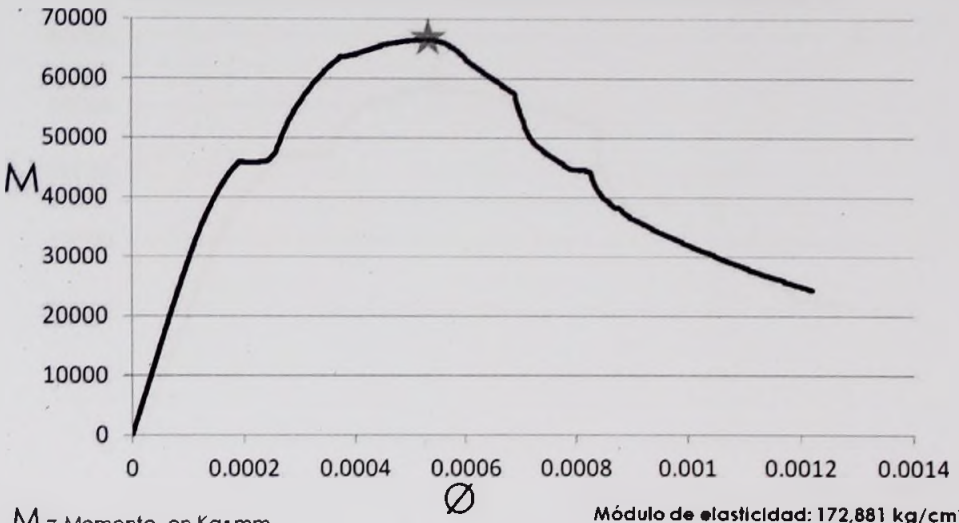
Vel. De deformación = 3 mm/min
XT = 635 mm
X1 = 158 mm
X2 = 320 mm
X3 = 160 mm
De = 44 mm
Di = 25 mm
Dn = 52 mm
Distancia entre apoyos: 560 mm
Espesor de pared (e) = 9.5mm
Área de la sección = 10.30 cm²
Carga soportada por la probeta: 475.00 kg

Momento máximo: 66,500 kg•mm



Flexión (prueba No.5)

Comportamiento del esfuerzo de flexión ejercido por la probeta:



M = Momento, en Kg•mm

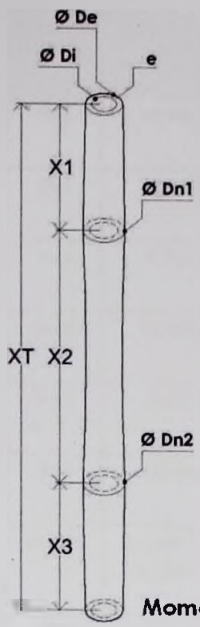
Ø = Curvatura, en mm⁻¹

Módulo de elasticidad: 172,881 kg/cm²

Esfuerzo máximo de flexión : 887.6 kg/cm²

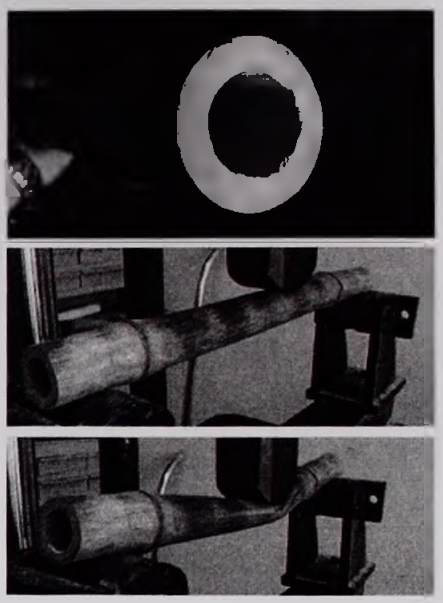
★ **Momento máximo: 66,500 kg•mm (66.5 kg•m)**

Flexión (prueba No.6)



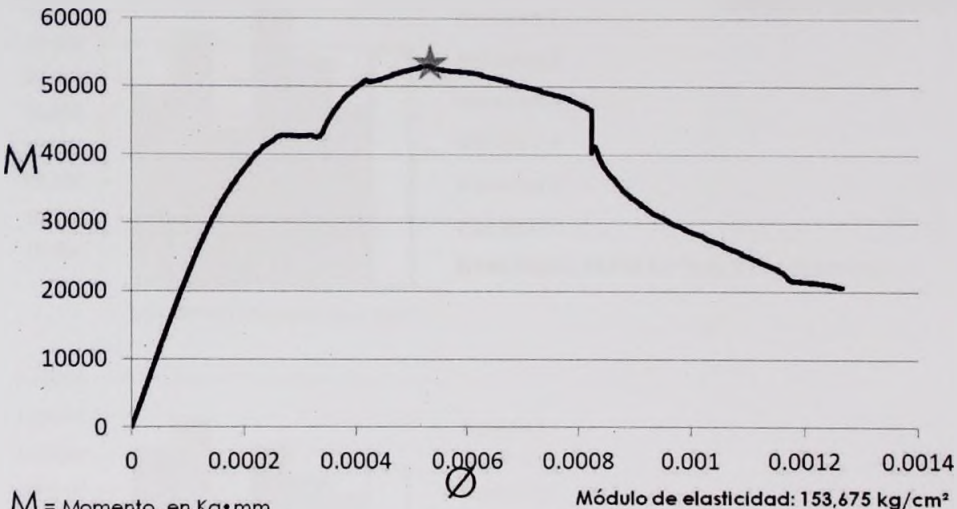
Vel. De deformación = 3 mm/min
XT = 570 mm
X1 = 162 mm
X2 = 325 mm
X3 = 75 mm
De = 43 mm
Di = 27 mm
Dn = 50 mm
Distancia entre apoyos: 510 mm
Espesor de pared (e) = 8mm
Área de la sección = 8.80 cm²
Carga soportada por la probeta: 416.00 kg

Momento máximo: 53,040 kg•mm



Flexión (prueba No.6)

Comportamiento del esfuerzo de flexión ejercido por la probeta:



M = Momento, en Kg•mm

Ø = Curvatura, en mm⁻¹

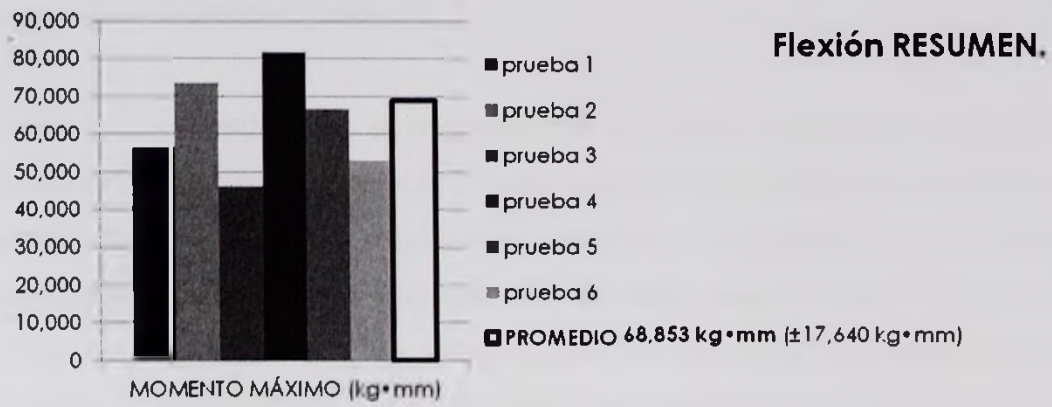
Módulo de elasticidad: 153,675 kg/cm²

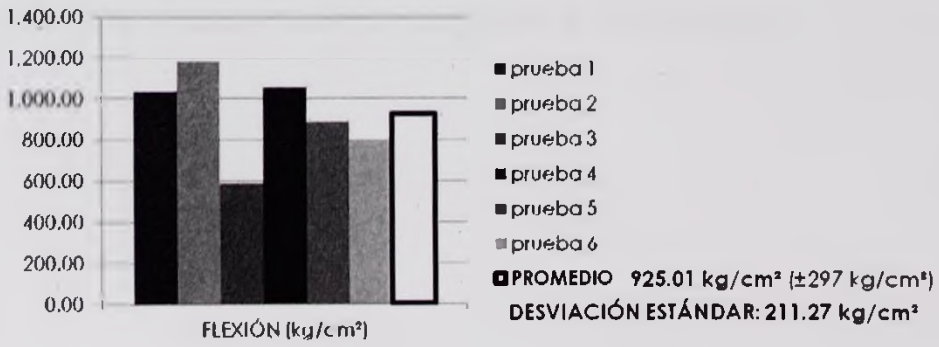
Esfuerzo máximo de flexión : 804.5 kg/cm²

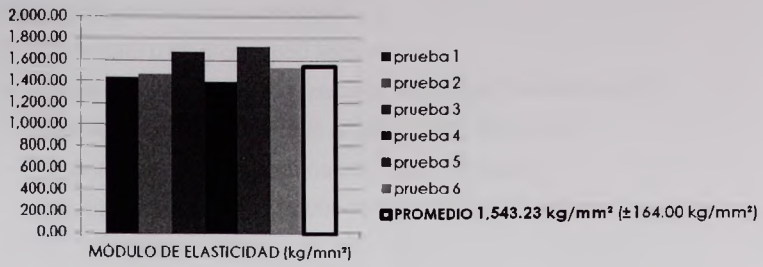
★ **Momento máximo: 53,040 kg•mm (53.04 kg•m)**

Flexión RESUMEN.

Prueba	Momento Máximo	Esfuerzo Máximo de flexión	Módulo de Elasticidad	Dimensiones de la probeta	Notas
No 1	56,500 Kg•mm	1,033.11 kg/cm²	1,440.69 kg/mm²	Ø40mm, Ø24mm, 647mm	Un nudo central.
No.2	73,400 Kg•mm	1,182.8 kg/cm²	1,472.29 kg/mm²	Ø42mm, Ø26mm, 595mm	Un nudo central.
No 3	46,200 Kg•mm	589.2 kg/cm²	1,679.09 kg/mm²	Ø44mm, Ø22mm, 612mm	Dos nudos centrales.
No.4	81,480 Kg•mm	1,052.9 kg/cm²	1,401.52 kg/mm²	Ø44mm, Ø23mm, 598mm	Dos nudos centrales.
No.5	66,500 Kg•mm	887.6 kg/cm²	1,728.81 kg/cm²	Ø44mm, Ø25mm, 635mm	Dos nudos centrales.
No.6	53,040 Kg•mm	804.5 kg/cm²	1,536.75 kg/cm²	Ø43mm, Ø27mm, 570mm	Dos nudos centrales.
PROM.	**68,853.3 Kg•mm** (±17,640 Kg•mm)	**925.01 kg/cm²** (±297 kg/cm²)	**1,543.23 kg/mm²** (±164 kg/mm²)		
D.E		**211.27 kg/cm²**			







Comparativa con otros materiales

Los resultados promedio de las pruebas mecánicas hechas al bambú (*dendrocalamus strictus*) fueron comparados con los esfuerzos a compresión, flexión y tensión que presentan otros materiales comúnmente empleados en la construcción, específicamente el acero, el concreto y la madera. Así mismo se comparó la densidad, de modo que pudiera establecerse una relación entre resistencia y densidad en cada uno de los materiales probados (Tabla A1.1).

Dado que la madera es el material con el que comúnmente el bambú suele ser comparado, y debido a la abundancia de especies maderables empleadas en la construcción, se seleccionaron especies de los dos principales grupos en los que éstas se dividen para su estudio. Para el grupo de las latifoliadas fue seleccionado el "Machiche" o *lonchocarpus castilloi*, y para el grupo de las coníferas se seleccionó el "Pino chino" o *pinus leiophylla* las cuales se describen a continuación:

Machiche (lonchocarpus castilloi)[1]

- Densidad: 0.85 g/cm³ (850 kg/cm³)
- Resistencia a compresión paralela: 85 N/mm² (866.46 kg/cm²)
- Resistencia a la flexión: 195 N/mm² (1,987.76 kg/cm²)
- Resistencia a la tensión paralela: 1,999.09 kg/cm²
- Módulo de elasticidad: 18,900 N/mm² (192,660.55 kg/cm²)

Pino chino (pinus leiophylla)[2]

- Densidad: 54 g/cm³ (540 kg/cm³)
- Resistencia a compresión paralela: 46 N/mm² (468.90 kg/cm²)
- Resistencia a la flexión: 90 N/mm² (917.43 kg/cm²)
- Resistencia a la tensión paralela: 908.61 kg/cm²
- Módulo de elasticidad: 10,850 N/mm² (110,601.42 kg/cm²)

---

[1] Fuentes:

- Domínguez, César, 2008, **Investigación de mercado para la exportación de piso de madera de la especie manchiche (*lonchocarpus castilloi*) para la empresa comunitaria de servicios del bosque, s.a**. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, y

- Silva, José, 2006, **Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México Tomo I**, CONAFOR, SEMARNAT, México.

[2] Fuentes:

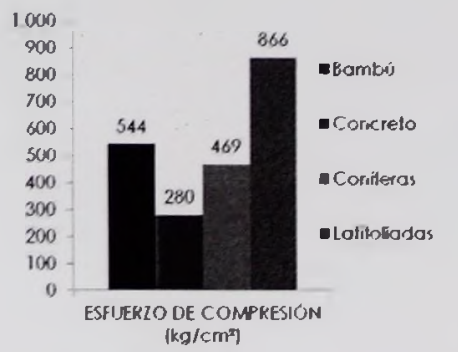
- Honorato, J.Amador, 2002, **Caracterización tecnológica de algunas especies de coníferas de la región de El Salto P.N (Durango)**, CONAFOR, México
- Silva José, 2006.

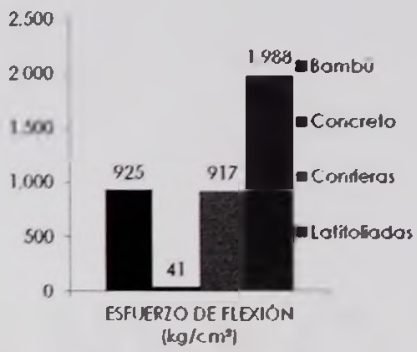
Tabla A1.1 Comparativa entre el bambú y otros materiales

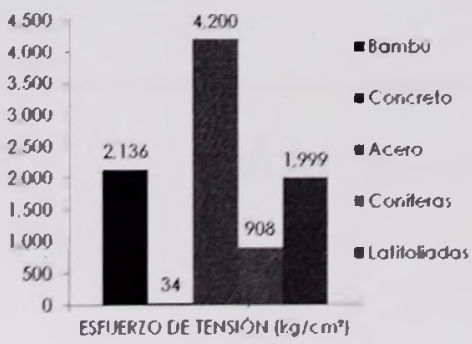
	BAMBÚ (*dendrocalamus strictus*)	CONCRETO (uso generalizado)	ACERO (grado 42)	MADERA DE ESPECIES CONÍFERAS Clase B (Pino chino*)	MADERA DE ESPECIES LATIFOLIADAS Grupo I (Machiche**)
Esfuerzo de Compresión. (kg/cm²)	**544**	280	N/E	469	866
Esfuerzo de Flexión. (kg/cm²)	**925**	41	N/E	917	1,988
Esfuerzo de Tensión. (kg/cm²)	**2,136**	34	4,200	908	1,999
Densidad (kg/m³)	**806**	2,320	7,850	540	850

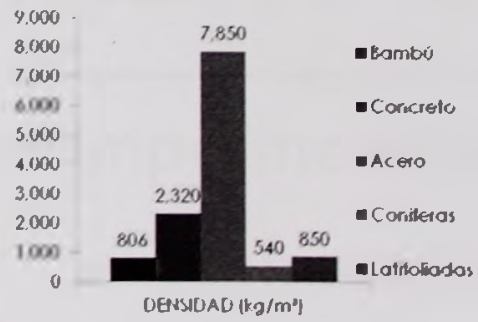
La tabla indica valores promedio para cada caso.
* *pinus leiophylla*
** *lonchocarpus castilloi*
N/E: No especificado.

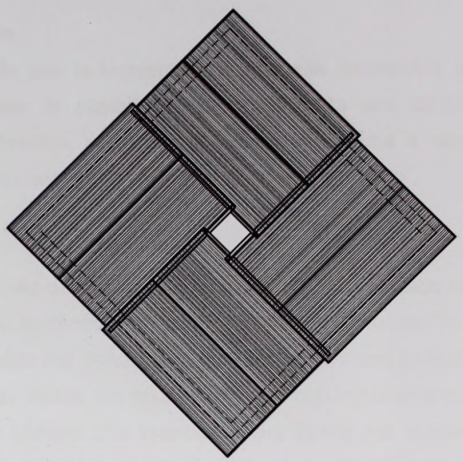
Gráficas Comparativas entre el bambú y otros materiales











ANEXO 2

Membrana impermeable experimental

ANEXO 2

MEMBRANA IMPERMEABLE A BASE DE TELA DE MANTA CON BARNIZ DE POLIESTIRENO RECICLADO

Introducción

Considerando que la techumbre desarrollada (techumbre alternativa de bambú) posee la posibilidad de ser cubierta con distintos sistemas impermeabilizantes, se refiere aquí la opción hecha a base de tela de manta impregnada con "barniz de poliestireno reciclado".

Materiales

El barniz a base de poliestireno expandido (EPS) reciclado es un producto resultado de la dilución de dicho material en "limoneno", una sustancia natural extraída del aceite de la cáscara de diversos cítricos. Aplicándolo sobre tela de manta (un textil económico con tejido abierto, extraído del algodón) se obtiene una membrana que puede ser colocada sobre los paneles de bambú que cubren la techumbre, adaptándose a su forma, y haciéndolo impermeable (Imagen A2.1).

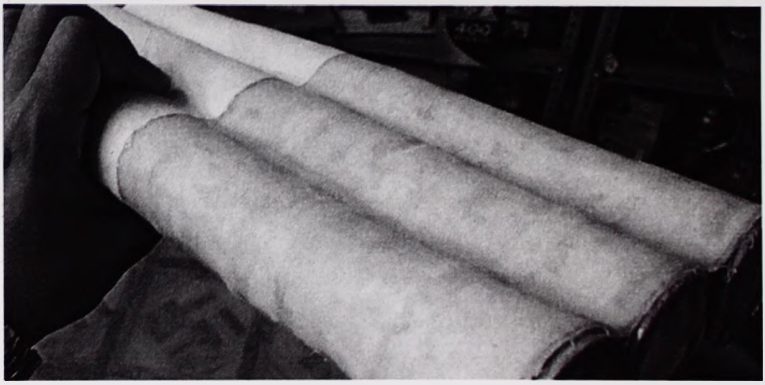


Imagen A2.1 Membrana de textil con barniz de EPS aplicada sobre bambú

Fotografía: Carlos Uribe

Otra de las cualidades de este sistema es la rigidización del material al secarse, creando así un elemento monolítico semejante a la fibra de vidrio, que eventualmente rigidizaría a la estructura hecha de paneles de bambú, haciéndola más estable; al mismo tiempo, por tratarse de un elemento traslúcido, permite el paso de cierta cantidad de iluminación al interior. (Imagen A2.2)

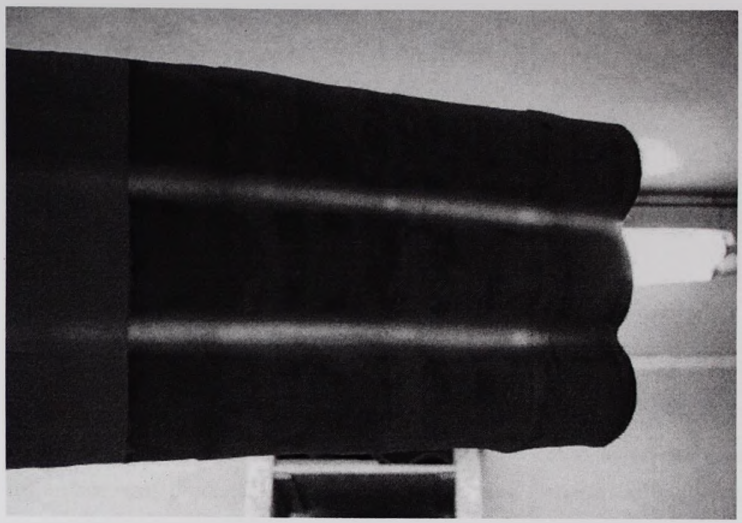


Imagen A2.2 Membrana de textil con barniz de EPS; efecto traslúcido

Fotografía: Carlos Uribe

Degradación

Es importante mencionar que, si bien este método se presenta como una alternativa ecológica de impermeabilización, al ser compuesta por poliestireno presenta degradación ante la incidencia de rayos UV provenientes del sol, por lo que en su fase experimental se hizo necesaria la aplicación de un elemento que le proteja de estos rayos. En este sentido, una propuesta es la aplicación de una capa de impermeabilizante convencional (Imagen A2.3).

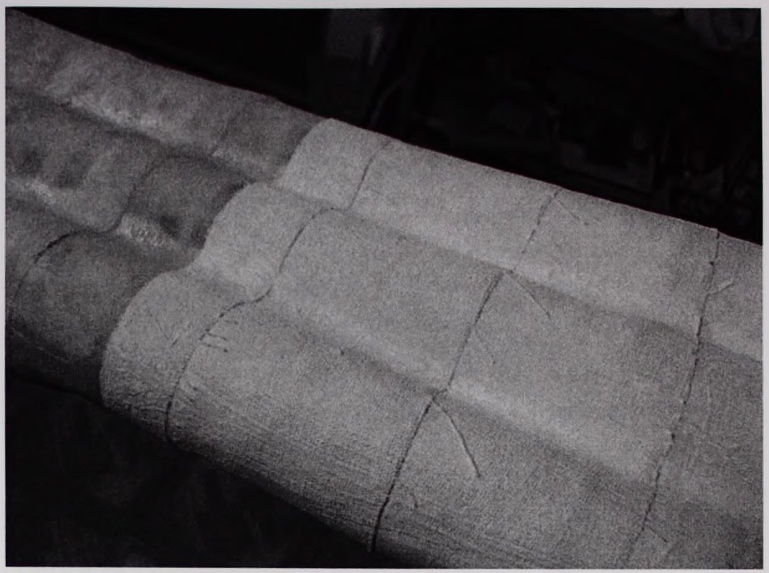


Imagen A2.3 Aplicación final de una capa de impermeabilizante comercial
Fotografía: Carlos Uribe

Riesgos

Por otro lado, cabe resaltar que tanto el limoneno como el poliestireno expandido son productos inflamables, por lo que deberán tenerse las precauciones necesarias para su uso, tal como se tuvieran que tener en una cubierta hecha a base de paja o palma, elementos inflamables también.

Aplicación

Para la aplicación de la membrana impermeable de EPS reciclado sobre los paneles de bambú, es necesario lijar la superficie donde ésta será colocada, pues el bambú posee un acabado natural lustroso y rígido que dificulta la adherencia de la membrana. Posteriormente se coloca la tela de manta seca sobre la superficie al mismo tiempo que se le va aplicando el barniz de EPS con una brocha, procurando que la tela ya impregnada

con el barniz se adapte a la superficie acanalada del panel hecho con cañas de bambú (cañas de entre Ø1.5cms y Ø3cms), hasta cubrir toda la superficie a impermeabilizar. Este procedimiento deberá repetirse hasta obtener tres capas de textil con barniz, necesarias para obtener un grosor de membrana que al secarse presente una rigidez suficiente para evitar su agrietamiento ante las eventuales deformaciones que el panel pudiera sufrir por efectos del viento, o de soporte de algún elemento pesado como el de una persona.

La cantidad requerida para cubrir 1m² de superficie de panel de bambú es de aproximadamente 1,200ml de barniz de EPS Reciclado, y 4m² de tela de manta, considerando un porcentaje de encogimiento, así como la forma irregular de la superficie. El tiempo de secado (evaporación del limoneno) es de aproximadamente 1hr, y de 24hrs para obtener su rigidez final.

Fabricación del barniz de EPS reciclado

Para la preparación de 1,200ml de barniz de EPS reciclado se requieren 1,000ml de limoneno y 400gr de poliestireno expandido. En la fase experimental fue empleado un recipiente de 3.5lt de capacidad, limoneno de cáscara de naranja dulce, y EPS reciclado y pulverizado (Imágenes A2.4 y A2.5).

Imagen A2.4 Bolsa con 400gr de EPS pulverizado

Fotografía: Carlos Uribe

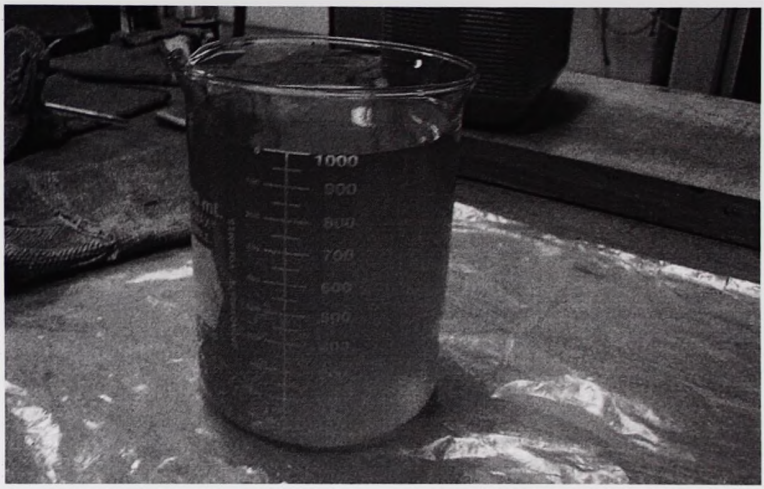


Imagen A2.5 Limoneno de cáscara de naranja dulce (1,000ml)

Fotografía: Carlos Uribe

El procedimiento es colocar aproximadamente 100ml de limoneno en un recipiente, añadir EPS suficiente para llenar el recipiente hasta 1/4 de su capacidad y agitar suavemente la mezcla hasta que el EPS se disuelva

por completo en el limoneno; posteriormente se seguirá añadiendo EPS a la mezcla hasta que se dificulte la disolución y entonces se agregará más limoneno hasta disolver los 400gr de EPS. Cabe señalar que los 400gr de EPS al disolverse ocupan un volumen de 200ml, es por eso que son 1,200ml de barniz la cantidad final obtenida al emplear 1,000ml de limoneno (Imagen A2.6).

Imagen A2.6 Preparación del barniz de EPS reciclado

Fotografía: Carlos Uribe

Cabe aclarar que la proporción entre la cantidad de EPS y limoneno a emplear puede variar, obteniéndose así diversas viscosidades; en este sentido, las proporciones empleadas responden a un nivel de viscosidad adecuado para su aplicación y cantidad de EPS por m² de textil (Imagen A2.7).

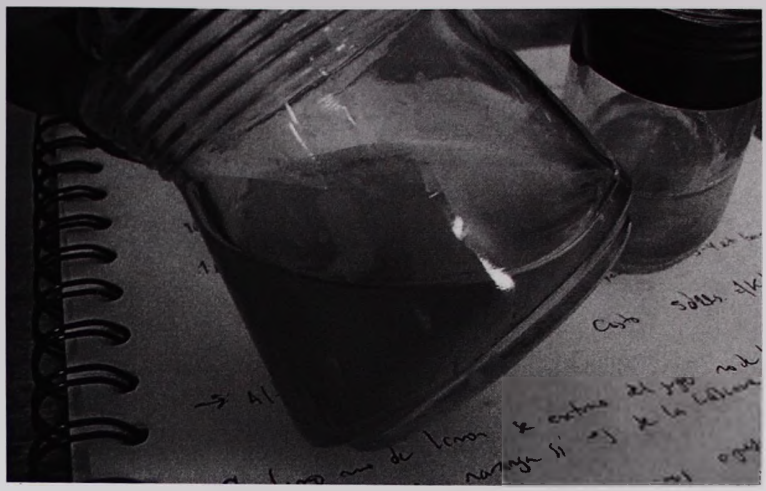


Imagen A2.7 Viscosidad del barniz de EPS con limoneno, proporción 400gr/1lt

Fotografía: Carlos Uribe

Costos

Desglose aproximado de materiales y costos necesarios para cubrir la superficie de paneles de bambú (aprox. 20m²):

Tela de manta (rollo de 1.40m): 66ml. (x $30 ml) = $1,980.00 M.N

Limoneno: 20Lt (x $5.00 US. Dollar) = $100 US Dollar = $1,200.00 M.N

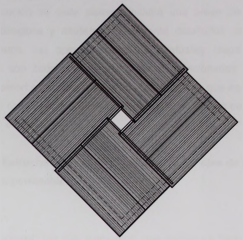
Poliestireno expandido ("unicel"): 8Kg = $0.00 (considerando reciclaje).

TOTAL: $3,180.00 M.N

(Costo por M²: $159.00 M.N)

Créditos

El desarrollo de esta membrana, forma parte de la tesis de licenciatura en Ingeniería Industrial del Br. Juan Sebastián Couoh Nah, alumno del Instituto Tecnológico de Oxkutzcab Yucatán, tutorada por el Dr. J. Gonzalo Carrillo Baeza del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).



ANEXO 3

Sistemas de techumbres comparativos

ANEXO 3

SISTEMAS DE TECHUMBRE COMPARATIVOS

Caracterización de los sistemas de techumbre

La caracterización de cada sistema incluirá una breve descripción del mismo, un desglose y análisis relativamente detallados de materiales, pesos y costos, así como comentarios puntuales respecto a datos relacionados con cada uno de los criterios mencionados (durabilidad, economía, confort e impacto ambiental). Cabe señalar que en cada uno de los casos, se considerará la cantidad de material necesario para cubrir una superficie de 4 x 4m.

A. Sistema de Estructura de cañas y Cubierta de paneles de bambú, con Membrana impermeable

Descripción

Sistema compuesto por tres elementos: una estructura hecha a base de cañas de bambú, una cubierta hecha con paneles de bambú (la cual es colocada sobre la estructura), y finalmente una membrana impermeable aplicada sobre los paneles.

Desglose del sistema

1. Estructura:

- Material: Bambú de la especie *dendrocalamus strictus*.
- Formato: Cañas de aprox. Ø4.5cms. y 2.5m de longitud.
- Cantidad a emplear: 8 piezas.
- Peso total de la estructura: 19.5kg.
- Costo total de la estructura: $330 M.N ($280 bambú + $60 herrajes)

- Durabilidad de la estructura: de 10 a 15 años[1]

2. Cubierta:

- Material: Bambú de la especie *dendrocalamus strictus*.
- Formato: Paneles de 2.50 x 1.00m, hechos con cañas de aprox. Ø2.5cms. y 2.5m de longitud.
- Cantidad a emplear: 8 piezas.
- Peso total de la cubierta: 224kg
- Costo total de la cubierta: $6,000 M.N
- Durabilidad de la cubierta: de 10 a 15 años[2]

3. Membrana impermeable[3]:

- Material: Tela de manta y barniz de poliestireno reciclado.
- Formato: Metro cuadrado con 3 capas de manta impregnado con barniz.
- Cantidad a emplear: 20m²
- Peso total de la membrana: No determinado.
- Costo total de la membrana: $3,180 M.N
- Durabilidad de la membrana: No determinado (fase experimental).

Resumen del Sistema

- Peso total del sistema: 243.5kg.
- Costo total del sistema: $9,510 M.N
- Durabilidad del sistema: Estimada entre 10 y 15 años.
- Acero requerido: 1.05kg (agregar al peso total del sistema)

---

[1] Según datos del INBAR (International Network of Bamboo and Rattan), y en **Guilles Lessard y Amy Chouinard: "Bamboo research in Asia, procedings of a workshop held in Singapore 28-30 May 1980"** , 1980 Otawa, Ont. Canada. 228pp. (revisión pp.165 – 172)

[2] *Idem*

[3] El desarrollo de esta membrana, forma parte de la tesis de licenciatura en Ingeniería Industrial del Br. Juan Sebastián Couoh Nah, alumno del Instituto Tecnológico de Oxkutzcab Yucatán, tutorada por el Dr. J. Gonzalo Carrillo Baeza del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) Mérida Yucatán, México (2011).

B. Sistema de Vigueta y Bovedilla

Descripción

Sistema compuesto por una base estructural de viguetas de concreto armado y bovedillas de concreto, con un refuerzo superior de malla de acero embebida en una capa de concreto (capa de compresión), una cadena perimetral de concreto armado (cadena de enrase), y una capa de mortero para dar una pendiente tal que permita el desagüe (calcreto).

Desglose del sistema

1. Vigueta[4]:

- Material: Vigueta de concreto 12-3, con varilla de acero.
- Formato: Piezas de 4ml.
- Cantidad a emplear: 24.96ml
- Peso total del las viguetas: 524.16kg
- Costo total de la viguetas: $952.47 M.N
- Durabilidad de las viguetas: estimada en 50 años[5].

2. Bovedilla[6]:

- Material: Bovedilla de concreto hidráulico y agregados.
- Formato: Piezas de 15 x 25 x 56 cm.
- Cantidad a emplear: 100 pzas.
- Peso total de las bovedillas: 1,800kg
- Costo total de las bovedillas: $1,023 M.N
- Durabilidad de las bovedillas: No determinada.

---

[4] Las cantidades de vigueta y bovedilla necesarias para cubrir $1m^2$ fueron tomadas de la tabla de vigueta y bovedilla de la empresa MITZA.

[5] Vida útil de proyecto aproximada, de elementos de concreto armado usados en obras comunes, considerando esta como el "tiempo período necesario para que el frente de carbonatación o el frente de cloruros alcance la armadura" en: Do Lango, Paulo Roberto, **Estructuras de concreto, proyectar para la durabilidad**, Seccional colombiana del ACI, Colombia (sin fecha).

[6] Idem (referencia 4).

3. Malla electrosoldada[7]:

- Material: Malla electrosoldada 6-6/10-10 con alambre de acero Cal.10
- Formato: M^2
- Cantidad a emplear: $16m^2$
- Peso total de la malla: 15.03kg
- Costo total de la malla: $214.88[8]
- Durabilidad de la malla: No determinada.

4. Cadena de enrase[9]:

- Material: Armex electrosoldado 15-15-4 y concreto f'y = $150kg/cm^2$
- Formato: Metro lineal (ml)
- Cantidad a emplear: 16ml
- Peso total de la cadena: 855.72kg
- Costo total de la cadena: $2,160 M.N[10]
- Durabilidad de la cadena: Estimada en 50 años[11]

5. Capa de compresión:

- Material: Concreto de f'c = $200kg/cm^2$
- Formato: Metro cúbico (m^3)
- Cantidad a emplear: $0.488m^3$
- Peso total de la capa de compresión: 1,133kg
- Costo total de la capa de compresión: $585.60[12]
- Durabilidad de la capa de compresión: No determinada

---

[7] Malla electrosoldada, empresa "VILLACERO", [http://www.villacero.com/resources/file/eb62c60d4a90f24/Mallaele.pdf]

[8] Considerando un precio de $13.43 por m^2 de malla (abril de 2011).

[9] Castillo electrosoldado, empresa "SAAPSA", [http://www.saapsa.com.mx/upload/fichas/FT_castillo_electrosoldado.pdf]

[10] Dato tomado a partir de un presupuesto genérico de obra, donde se indica un costo por ml de $135.00 (abril de 2011)

[11] *Ídem* referencia 9.

[12] Considerando un precio de $1,200 M.N por m^2 de concreto f'c = $200kg/cm^2$ (abril de 2011).

6. Calcreto:

- Material: Mezcla de cemento, cal, polvo y grava.
- Formato: metro cúbico (m^3)
- Cantidad a emplear: 0.80m^3
- Peso total del calcreto: 1,856 kg
- Costo total del calcreto: $680[13]
- Durabilidad del calcreto: No determinada.

7. Mano de obra.

   El costo de la mano de obra considerará un 70% del costo total de los materiales, el cual es de $5,615.95, así:

- Costo total de la mano de obra: $3,931.16

Resumen del Sistema

- Peso total del sistema: 6,183.35kg
- Costo total del sistema: $9,547.12
- Durabilidad del sistema: estimada en 50 años.
- Acero requerido: 46.8kg (contenido en el peso total del sistema)

C. Sistema de Estructura de madera con Cubierta de láminas de cartón petrolizadas

Descripción

Sistema compuesto por dos elementos: una estructura hecha a base de barrotes de madera, y una cubierta hecha con lámina de cartón petrolizada.

[13] Considerando un precio de $850.00 M.N por m^3 de calcreto.

Desglose del sistema

1. Estructura:

- Material: Madera de pino sin tratar.
- Formato: Barrotes de 1.5" x 3" x 8.25' (4cm x 7.5cm x 2.50m)
- Cantidad a emplear: 28 barrotes.
- Peso total de la estructura: 167kg.
- Costo total de la estructura: $840 M.N
- Durabilidad de la estructura: Estimada entre 5 y 10 años[14]

2. Cubierta:

- Material: Lámina de cartón acanalada y petrolizada.
- Formato: Piezas de 1.20 x 0.60m
- Cantidad a emplear: 30 piezas.
- Peso total de la cubierta: 60kg
- Costo total de la cubierta: $345 M.N
- Durabilidad de la cubierta: Estimada en 3 años[15]

Resumen del Sistema

- Peso total del sistema: 227kg.
- Costo total del sistema: $1,185 M.N
- Durabilidad del sistema: Estimado en 3 años[16].
- Acero requerido: 1.5kg (agregar al peso total del sistema)

[14] Fuente: Norma IRAM 9.600: 1998. **Preservación de maderas. Maderas preservadas mediante procesos con presión en autoclave,** [http://www.inti.gob.ar/maderas/pdf/durabilidad.pdf]
[15] Dato obtenido a partir de entrevistas a proveedores del material en el estado de Yucatán.
[16] Partiendo de la durabilidad de la lámina de cartón.

D. Sistema de Estructura de madera con Cubierta de lámina metálica galvanizada

Descripción

Sistema compuesto por dos elementos: una estructura hecha a base de barrotes de madera, y una cubierta hecha con lámina metálica galvanizada.

Desglose del sistema

1. Estructura:

- Material: Madera de pino sin tratar.
- Formato: Barrotes de 1.5" x 3" x 8.25' (4cm x 7.5cm x 2.50m)
- Cantidad a emplear: 28 barrotes.
- Peso total de la estructura: 167kg.
- Costo total de la estructura: $840 M.N
- Durabilidad de la estructura: Estimada entre 5 y 10 años

2. Cubierta:

- Material: Lámina acanalada galvanizada tipo R-101 calibre 28.
- Formato: Piezas de 2.50 x 1m.
- Cantidad a emplear: 10 piezas.
- Peso total de la cubierta: 100kg.
- Costo total de la cubierta: $1,930 M.N
- Durabilidad de la cubierta: Estimada en más de 10 años.

Resumen del Sistema

- Peso total del sistema: 267kg.
- Costo total del sistema: $2,770 M.N
- Durabilidad del sistema: Estimada entre 5 y 10 años[17].

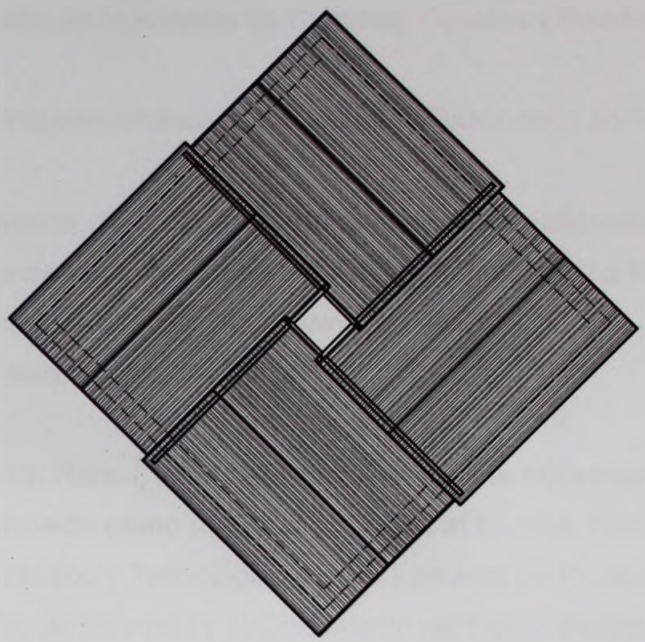
[17] A partir de la durabilidad de la estructura de madera, y considerando poco factible el conservar las láminas y sustituir solo la estructura.

- Acero requerido: 101kg (agregar 1kg usado en clavos, al peso total del sistema).

	Peso total (kg)	Costo total (MNX)	Durabilidad estimada (años)	Acero contenido (kg)
Bambú	243	9,510	10/15	1.05
V y B	6,183	9,547	50	46.8
L de C	227	1,185	3	1.5
L de M	267	2,270	5/10 años	101kg

Tabla A3.1 Datos comparativos entre las 4 alternativas de techumbre

Elaboración: Carlos Uribe



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Alarcón, Deissy, 2005, **Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles**, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, España, [http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6166/01Dan01de01.pdf?sequence=1]

2. Barbaro, Giovanna, 1997, **Transformación e industrialización del bambú**, segunda parte de la tesis publicada en Venecia: "La biónica del bambú", Barcelona, España, [http://www.sustainable-technologies.eu/articles/bambu-2.pdf]

3. Bejarano López, Rafael, 2002, **Metodología para la construcción de vivienda utilizando como material principal el bambú**, Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico para el Fomento de Producción y Financiamiento de Vivienda y el Crecimiento del Sector Habitacional, Veracruz, México.

4. Caballero Nieto, J., A. Martínez y V. Gama. 2001, **El uso y manejo tradicional de la palma de guano en el área maya de Yucatán**, CONABIO. Biodiversitas 39: 1-6, México.

5. Chaize, Thomas, 2006, **King Hubbert: el pico de producción del petróleo**, Energy & Mining Newsletter, en [www.dani2989.com]

6. Contreras Manzanilla, Adrian, 2010, **Posibilidad de re-uso del sistema constructivo de rollizos y bah pek, como tecnología alternativa en la autoproducción de vivienda de bajo costo**. Tesis para obtener el grado de maestría en arquitectura, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura. Mérida Yucatán, México.

7. Crowther, Philip, 2002, "Design for buildability and the deconstruction consequences", **Design for Deconstruction and Materials Reuse**, Publicación CIB 272, Karlsruhe, Alemania, [http://eprints.qut.edu.au/2885/1/Crowther-TG39-2002.PDF]

8. Do Lango, Paulo Roberto, (sin fecha) **Estructuras de concreto, proyectar para la durabilidad**, Seccional colombiana del ACI, Colombia, [http://biblioteca.duoc.cl/bdigital/esco/Ingenieria_y_%20tec_construccion/071.pdf]

9. Domínguez, César, 2008, **Investigación de mercado para la exportación de piso de madera de la especie manchiche (lonchocarpus castilloi) para la empresa comunitaria de servicios del bosque, S.A**. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1908_IN.pdf].

10. Erazo, Enrique, Roberto Melí, 1978, **Sistemas de techo para autoconstrucción**, UNAM, México pp.3-5.

11. Gálligo, Pedro (coordinador), 2005, **Un techo para vivir. Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina**, Varios países, CYTED y otros. 559pp.

12. García, Carmen, Angélica Quiñones, (2003), "...Y sin embargo se vive. De la infravivienda a la vivienda urbana en Mérida Yucatán, México", en Scripta Nova, **Revista electrónica de geografía y ciencias sociales**, Universidad de Barcelona. Vol. VII, núm. 146(143), 1 de agosto de 2003, [http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146(143).htm#_ednref15]

13. González Héctor, 2007, **Resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie *guadua angustifolia* Kunth**, Revista Scientia et Technica, no.35, Agosto de 2007, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, [http://produccionmaslimpia.org/documentos/articulospdf/35.pdf]

14. Guilles Lessard y Amy Chouinard, 1980, **Bamboo research in Asia, procedings of a workshop held in Singapore 28-30 May 1980**, Otawa, Ont. Canada. 228pp. (revisión pp.165 – 172), [http://idl-bnc.idrc.ca/dspace/bitstream/10625/20314/1/42889_p165-172.pdf]

15. González Lobo, Carlos, 1998, **Vivienda y ciudad posibles**, Coedición ESCALA – UNAM, Colombia- México 229p.

16. Honorato, J.Amador, 2002, **Caracterización tecnológica de algunas especies de coníferas de la región de El Salto P.N (Durango)**, CONAFOR, México, [http://conafor.gob.mx/biblioteca/foros/Madera/CARACTERIZACION_TECNOLOGICA_DE_ESPECIES_DE_CONIFERAS.PDF]

17. K.Ghavami, 1995, "Bamboo: Low cost and energy saving construction materials", en Yan Xiao, Masafumi Inoue y S.K. Paudel (eds.), **Modern Bamboo Structures**, Changsha, China, Octubre 2007.

18. Kries, Mateo, 2000, **Grow your own house - Simón Vélez and bamboo architecture**, Vitra Design Museum, Alemania.

19. Lawson, Bill, 1996, **Building Materials Energy and the Environment**, Red Hill, Australia, Royal Australian Institute of Architects, [http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/7/55868-7.pdf]

20. Magno de Castro, Roberto, 2005, **O bambú no Brasil e no Mundo**, Brasil, 45pp.

21. McKibben, Bill, 1990, **El fin de la naturaleza**, Edit. Diana, México. 241pp.

22. Minke, Gernot, 2010, **Manual de construcción con bambú**, Alfonso Moreno (ed.), Cali, Colombia, 155pp.

23. Osorno B. Claudia Yolanda, "hacia la bioconstrucción" (2001), en Claudia Osorno, Carmen Durán y otros (eds.), **Bioética como puente entre ciencia y sociedad**, Bogotá, Colombia. Pp. 19-36

24. Paniagua-Sánchez, Deborah, 2008, **Sustentabilidad, habitabilidad y cultura**, Revista Cuadernos de arquitectura de Yucatán No. 20, pp.90-99.

25. Pérez Medina, Susana, 1993, **Transformación de la vivienda rural en Yucatán: estudios de caso**, Cuadernos de arquitectura de Yucatán, No.6, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de arquitectura, otoño, pp.38-45.

26. Ruiz Sabido, Rubí Elina, 2000, **La vivienda marginal como fenómeno cultural**, Revista Cuadernos de arquitectura de Yucatán No. 13, pp.12-18.

27. Salas, Julián, 1992, **Contra el hambre de vivienda, soluciones tecnológicas latinoamericanas**. CYTED. Edit. ESCALA, Bogotá, Colombia, 1992. 312pp.

28. Sánchez Zapata, Manuel, 2010, **Tecnologías alternativas: Innovación de un sistema modular de techo ligero para la autoconstrucción de la vivienda progresiva de la ciudad de Mérida, Yucatán**, Tesis para obtener el grado de maestría en arquitectura, Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura.

29. Serer, Marcos, 2004, **Modelo estratégico (SM) para le gestión de proyectos de carácter único**, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Proyectos de Ingeniería, Barcelona, España, [http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6833/01Msf01de01.pdf?sequence=1]

30. Silva, José, 2006, **Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México Tomo I**, CONAFOR, SEMARNAT, México.

31. Trueblood , Beatrice, Miguel Ángel Corzo, 1978, **Vivienda campesina en México**, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), México, 224pp.

OTROS:

1. Ayuntamiento de Mérida, 2004 , **Reglamento de Construcciones del municipio de Mérida**, [http://www.yucatan.gob.mx/gobierno/orden_juridico/Yucatan/Reglamentos/nr473rf1.pdf]

2. Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONACYT, 2009, **Convocatoria CONAVI-CONACYT 2009-01**, México.

3. Fideicomiso Fondo Nacional de Habitaciones Populares (FONAHPO), 1988, "**Manual de operación de programas de vivienda promovidos por grupos sociales**", México.

4. INBAR (International Network of Bamboo and Rattan), [http://www.inbar.int/publication/txt/tr17/Dendrocalamus/strictus.htm]

5. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) Norma 9.600, 1998, **Preservación de maderas**, Maderas preservadas mediante procesos con presión en autoclave, [http://www.inti.gob.ar/maderas/pdf/durabilidad.pdf].

6. IVEY Boletín del 17 de Febrero de 2009 en [http://notisureste.com/noticias/imprimir1744.html]

7. IVEY Informe trimestral de actividades, enero-marzo de 2009.

8. Leonard, Annie, 2007, documental: **La historia de las cosas**, [http://www.youtube.com/watch?v=ykfp1WvVqAY]

9. ONU, 1987, **Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo** (Comisión Brundtland): Nuestro Futuro Común, [http://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo_sostenible#cite_note-Brundtland_es-1]

10. Universidad Estatal a Distancia (UNED), 1983-1984, **La remoción en masa e inundaciones: dos fenómenos topográficos muy comunes**, San José, Costarica, [http://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/pdf/spa/doc1788/doc1788-contenido.pdf]