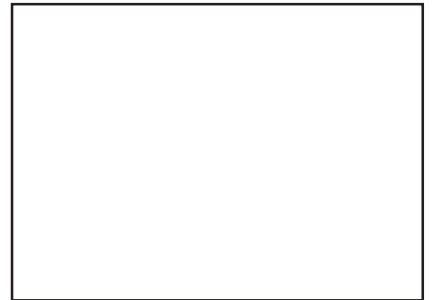
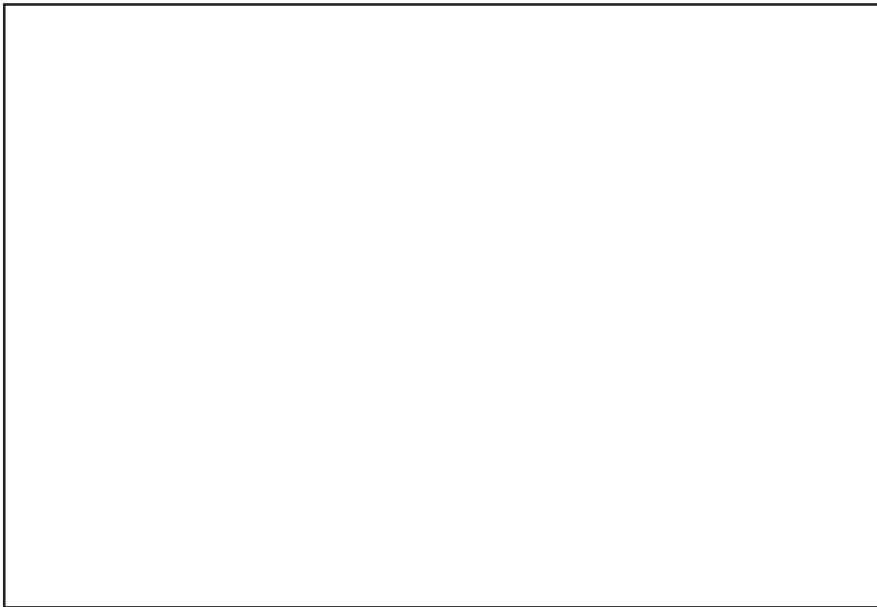


El bambú

como material de construcción



Autoconstrucción en 'Guadua' y madera. Programa Malhabar. Colombia. Foto de Jorge Arcila

RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL DE JORGE H. ARCILA
LOSADA POR J. ENRIQUE PERAZA
MAYO DE 1993. DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
ARQUITECTÓNICAS I DE LA U.P. DE CATALUNYA
DIRECTOR DE TESIS
JAUME AVELLANEDA
E.T.S.A. DEL VALLÉS

En este trabajo se analiza el bambú desde el punto de vista científico, forestal/medioambiental pero orientado a demostrar la vigencia del bambú como material con posibilidades tecnológicas en la construcción, al menos en determinados países.

El bambú se presenta como una alternativa a la cuestionada sostenibilidad de los bosques tropicales pero el trabajo se centra en las arquitecturas en bambú de las diferentes comunidades a lo largo de la historia, sus pautas tipológicas, sus componentes y sistemas constructivos. La tesis trata de demostrar que el bambú es un material alternativo barato, liviano, fácilmente trabajable, con tradición viva de oficios y resistente en aplicaciones constructivas.

Significado cultural del bambú

En la cultura occidental este material tiene una imagen negativa, ligada a ideas como artesanía oriental, productos decorativos de caña o construcciones elementales y burdas.

Paradójicamente en la cultura oriental el bambú tiene una imagen muy distinta: es sinónimo de riqueza ya que se obtiene de él, alimento, vivienda, herramientas, armas, papel, etc. Sólo los japoneses tienen registrados más de 1500 formas de utilización y los chinos 4000.

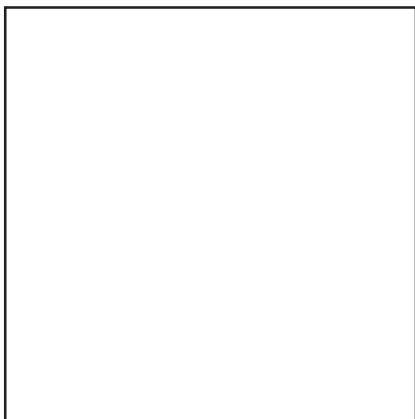
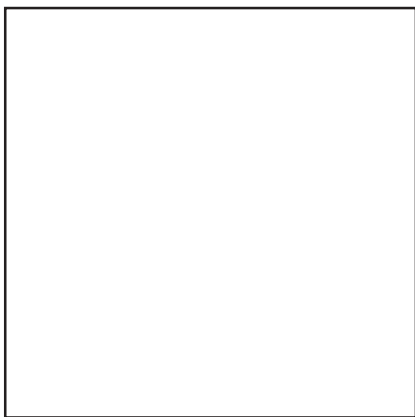
Los chinos fueron también los primeros en utilizarlo en la fabricación de papel y en la India se emplea actualmente en la fabricación de telas de rayón (seda artificial).

Los primeros 'cables' empleados en puentes colgantes se hicieron con bambú en el Himalaya (entre China y el Tíbet) donde aparecen algunos que cubren más de 75 m de luz sin apoyos.

Pero también en Occidente ha sido apreciado: Edison (1880) lo utilizó con éxito

Puente peatonal Celebes en Indonesia

Culmos de diferentes especies



Ajuste del tejido y recorte de los bordes de esterillas de bambú utilizadas como revestimiento.

en sus primeras bombillas, cuyos filamentos eran de bambú carbonizado, Piatti (1947) obtuvo de su destilación un líquido combustible para máquinas diesel y Antonio de León (1952) experimentó en tejidos de bambú para la fabricación de aviones.

El bambú es nativo de todos los continentes excepto Europa y se encuentra en los trópicos desde el nivel del mar hasta 4000 m de altura. Actualmente en Latinoamérica las especies de bambú más importantes están en peligro de extinción y el peligro sigue acentuándose, pese a que tiene fama de recurso inagotable, por lo que se le ha llegado a denominar como la 'madera de los pobres'. El bambú está distribuido por todo el mundo con 21 millones de ha, de las que los países del sudeste asiático ocupan 18, con la mayoría de las especies (800), mientras China posee 300 especies, Japón 660 y América 460.

El material. Análisis descriptivo

Botánicamente pertenece a la más primitiva de las ramíneas (como el maíz, la cebada, el arroz, etc.). Los bambúes herbáceos crecen en el sotobosque de la selva tropical, mientras que los leñosos pueden llegar hasta los 4000 m.

En América alcanzan alturas de 30 metros y diámetros de 20 cm pero en la India existen especies de mayor porte incluso.

Posee una estructura de ejes vegetativos segmentados por nudos sólidos, que crece verticalmente hasta su altura máxima entre 30 y 180 días según las especies, pero su máximo desarrollo varía entre 10 y 100 años. Su tallo, a diferencia de los árboles, es hueco aunque dividido por tabiques, y se denomina 'culmo' o 'caña'.

Sin embargo el bambú nace con el máximo diámetro que tendrá de por vida, el cual disminuye con la altura pero no aumenta con los años.

Es una planta perenne: cuando se tala, nace otra planta.

El 'culmo' puede ser erecto, arqueado o colgante, con pared gruesa, delgada, o ser sólido, con distintas texturas y coloraciones. Suele tener forma cilíndrica pero también se obtiene artificialmente un perfil cuadrado. El 'culmo' tiene un contenido de humedad y dureza distinto en los tallos inmaduros y los maduros, lo que le hace susceptible de cambios dimensionales como la madera pero a diferencia de ésta, empieza a contraerse desde el periodo de maduración.

La edad adecuada de corte del bambú está entre 2 y 6 años dependiendo de madurez del 'culmo' (después del cual se deteriora y muere) y de las especies y aplicación final: entre uno y tres años para aplicaciones artesanales y pulpa de papel, y de tres a seis años, para aplicaciones estructurales.

El corte se realiza a una altura entre 15 y 30 cm desde el suelo, en la porción superior del 'culmo'.

El bambú, al igual que la madera, puede sufrir ataques de coleópteros, isópteros (termes) y hongos y también existen tratamientos de protección. Es recomendable curar el bambú (pérdida del contenido de humedad y expulsión de sustancias diversas) para conservar el color natural y evitar el fendado. Se realiza de modo natural dejando recostados los tallos cortados lo más verticalmente posible, pero también se puede realizar mediante calentamiento, secado (al aire o en estufa), lixivación, impregnación, en-



calado, etc. Los métodos químicos (por pulverización o inmersión) son de baño (caliente y frío), imbibición, "Dip-Diffusion", "Boucherie simple o modificada", vacío-presión e ignifugación. Su durabilidad natural en contacto con el suelo es baja (de 4 a 8 años), bajo cubierta es mayor (de 10 a 20 años) pero es mucho mayor en condiciones higrotérmicas favorables.

La estructura anatómica del 'culmo' tiene una parte interior gruesa y altamente lignificada, mientras que la exterior está recubierta de cera de la que se deduce su resistencia a la absorción de agua. Sus fibras proporcionan la resistencia a la pared y son largas, rectas y afiladas, con una estructura polilaminar, que trabajan con la máxima capacidad en la dirección longitudinal y se comportan dentro de la pared como las barras de acero en el hormigón armado, al que ayudan a rigidizar los nudos.

Propiedades fisicomecánicas

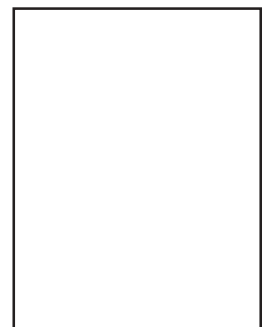
Su conductividad térmica es de 0,004 kcal/mh°C. Al igual que la madera, sus propiedades varían con la edad: los maduros (alrededor de tres años) tienen la máxima resistencia. Desde el punto de vista mecánico el bambú se puede comparar favorablemente con el hormigón, el acero y la madera (es dos veces más rígida que ésta): requiere el 57% de su masa cuando es usado como viga y el 40% cuando lo es

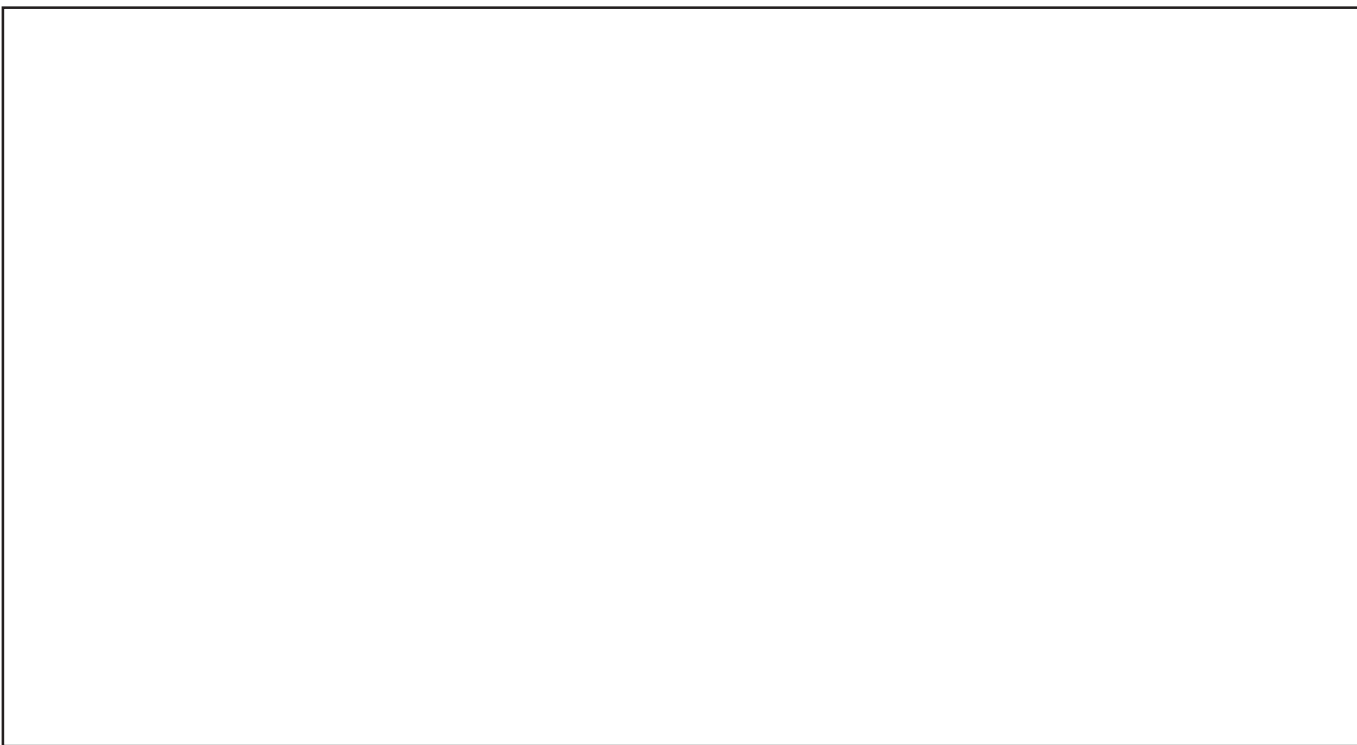
como columna. Es tan eficiente estructuralmente como el acero y puede acumular tanta energía de tensión como la madera. Su resistencia a flexión relativa es superior a la madera y al acero aunque su mejor propiedad mecánica es la tracción paralela a la fibra (200-300 N/mm²), aunque no se suele aprovechar porque presenta, como la madera, el problema de la continuidad de los nudos. Además la tendencia al rajado impide el empleo de clavos para asegurar las uniones. En cambio su resistencia a compresión que sí es su forma de trabajo más habitual, es buena, pero ha de considerarse junto al grado de sazónamiento (madurez) y a la relación longitud/diámetro. La paralela a la fibra varía (entre 630 y 860 kp/cm² y 520 y 930 kp/cm²) dependiendo si el diámetro es de 60 ó 32 mm respectivamente.

La resistencia a cortante está en torno a los 167 kp/cm², más baja que la madera. Su resistencia a flexión es 11.850 N/mm² y su módulo de elasticidad está en torno a los 200.000 kp/cm². Sobre su resistencia al fuego hay pocas experiencias, pero dada su mayor densidad y el alto contenido de sílice, es mayor que la madera. Además el nudo actúa como retardante en la ignición. Los componentes estructurales horizontales son más resistentes que los verticales y su ignición es lenta por lo que se incrementa el tiempo de evacuación en caso de incendio: es material combustible pero retardante.

Vivienda experimental en 'Guadua', módulo de manzana autoconstruida. Manizales (Colombia)

Ejemplos de uniones de elementos horizontales y verticales





Puente peatonal "Indios Páez", en Colombia

¹ Los cables trenzados se componen de un núcleo de tiras de bambú y segmentos tangenciales de culmo sin epidermis ni parte blanda interna. Alrededor de este núcleo se teje una trenza con tiras de corteza hasta un diámetro de 5 cm.

² Al ser el bambú liviano, las cimentaciones son superficiales de ladrillo u hormigón ciclópeo con un durmiente de madera aserrada. Cuando el terreno es inclinado se utiliza un sistema compuesto de pilastras que llegan hasta el plano de acceso a la vivienda. Las paredes se forman con montantes separados 30 ó 50 cm y diagonales, al estilo del 'balloon frame' norteamericano. La estructura va revestida de un revoco de tierra y fibras configurando el sistema "bahareque". Para los suelos se emplea la madera o esterilla (vivienda rural) y las pendientes de cubierta se forman con cerchas muy parecidas a las empleadas en estructuras de madera, que se recubren con 'latas' de bambú y teja. Otra cubierta típica es la cónica, con fuertes pendientes, y revestidas de caña o paja.

³ El muro de arcilla se construye dentro de un marco formado por elementos de madera: montantes, soleras y vigas a los que se integra la parrilla de bambú que se fija con unos travesaños de madera horizontales y verticales. La arcilla se aplica en los laterales con 3 a 5 capas especialmente preparadas con fibra, cola, cal y arena.

⁴ Tiene las siguientes características: 225 m de luz, cinco estribos intermedios y dos extremos, luces variables de 60 m, anchura de 2,75 m y sostenido por 10 cables de bambú de 17 cm de diámetro unidos por clavijas de madera. Cada pasamanos posee cinco cables de igual dimensión unidos verticalmente con barotes de madera. Las casetas de arranque y estribo central están contruidos con mampostería de granito.

Aplicaciones

Cada especie tiene una aplicación determinada, siendo la mayoría de ellas aplicadas en la elaboración de tejidos y productos de artesanía: muebles, cestería y facilitadas por las herramientas de corte, trenzado y doblado.

Durante la II Guerra Mundial se desarrollaron en China tableros aglomerados de bambú ('Plybamboo') destinados a la industria aeronáutica. Las láminas se fabricaban con capas de tejidos formados por estratos de fibras encolados entre sí, algunas veces alternados con chapas de madera.

Actualmente la industria de 'Plybamboo' y 'Glulam o Lamboo' está altamente tecnificada y aplica procesos de laminación con colas sintéticas. El sistema pasa por un precocido con microondas (para reducir las tensiones internas), formación de la manta y prensado. Se destina para carpintería y paneles de revestimiento, embalajes, etc. Taiwan exportaba por este rubro en 1993 150 millones de \$.

Otras aplicaciones como pulpa y papel, alimentación, medicina, herramientas, tuberías, juguetes y artículos de decoración se mencionan simplemente, por salirse de nuestro interés aunque tengan una enorme importancia económica.

Las herramientas de corte y preparación del bambú son prácticamente las mismas que para la madera, aunque existen algunas especiales: desmochadoras que facilitan la unión de testas, las cortadoras múltiples para la fabricación de esterillas, las laminadoras, etc.

Arquitectura

Conviene distinguir en el tiempo y la geografía las distintas etapas de desarrollo de la construcción con bambú aunque sin ánimo de ser exhaustivos.

Periodo primitivo

El periodo primitivo es poco conocido por haberse conservado pocas obras debido a lo perecedero del material, aunque la tradición constructiva se ha ido transmitiendo a lo largo de los siglos de una manera evolutiva.

Los sistemas vernáculos aprovechan los materiales disponibles en la región y tienden a reproducir formas orgánicas o a imitar otras formas conocidas como las primitivas tiendas nómadas.

Las construcciones vernáculos son el resultado del trabajo de muchas personas, de muchas generaciones y la colaboración entre constructores y usuarios. Las cualidades constructivas son tradicionales y se transmiten entre generaciones, estableciéndose un control colectivo del producto final.

En Latinoamérica se encuentran ejemplos de la época del Descubrimiento, en Colombia, Perú y Ecuador de sistemas de haces trenzados (el más frecuente) y mixtos: bambú, caña y barro o adobe. También del periodo primitivo datan los primeros puentes en Colombia contruidos por los indios Guambianos, donde se emplean cables torsionados y trenzados¹. En la región centro-occidental de Colom-

bia cobra importancia en el siglo XIX un sistema de construcción de viviendas de entramado, tanto de unidades aisladas como concentradas en una, dos y hasta seis plantas en terrenos en ladera².

En Oriente nos encontramos con los puentes chinos y la tradición japonesa que utiliza el bambú sobre todo en los jardines y como elemento decorativo, aunque en ocasiones se emplee en las cubiertas con carácter estructural.

Otras especies se emplean en canalones y bajantes de pluviales, como soporte interno y externo de techos de paja, en celosías de ventana y eventualmente como suelos o revestimientos de fachadas y como refuerzo interno recubierto con arcilla, de los tabiques fijos de la vivienda³.

El mejor ejemplo y el más largo puente colgante del mundo está en China. Es el de An-lan-Chiao sobre el río Min, de 225 metros de luz⁴.

Periodo contemporáneo

Conviene distinguir las estructuras de tipo marginal, de las planificadas o experimentales.

Las estructuras anónimas **marginales** se dan en suburbios de asentamientos urbanos de aluvión tanto en América como Asia, en condiciones de máxima pobreza y marginalidad. Tienen carácter transitorio y pésima ejecución con el consiguiente desprestigio en la imagen del material. Estos edificios son organismos vivos donde las piezas se van reemplazando continuamente

En el segundo grupo de edificios **experimentales** encontramos una serie de propuestas y soluciones técnicas empleadas en viviendas y otros edificios utilizadas tanto en solitario como con otros materiales.

La primera obra contemporánea de importancia la constituye la Glorieta de verano construida por Gaudí en 1880 para el Parque Güell, con bambú de Filipinas, consistente en la intersección de dos bóvedas de cañón según se deduce de la única fotografía que se conserva de la obra. Se trata, más que de una construcción efímera, de un estudio experimental sobre las posibilidades del material.

Otra serie de aportaciones de interés son las realizadas por la Universidad de Eindhoven (Holanda) donde se investigan estos sistemas desde 1974, cuando se empezó con un programa de Cooperación con el Tercer Mundo de construcciones escolares, depósitos y puentes. Estas armaduras han tenido un excelente resultado en cubiertas de medias y grandes luces por su elevada relación resistencia/peso. Los sistemas desarrollados fueron chequeados con anterioridad en

laboratorio⁵.

En la Universidad de Palmira (Colombia) se realizó en 1975 una estructura tridimensional destinada a construcciones escolares rurales. Se trataba de cubiertas realizadas con tres vigas de malla tetraédrica. Aunque nunca se llegó a poner en obra si fué la semilla para otras construcciones como las realizadas por el arquitecto Simón Vélez que se preocupó de diseñar un práctico sistema de uniones para resolver esfuerzos a tracción en armaduras de gran luz (esfuerzo para el que las estructuras de bambú están más preparadas).

Finalmente conviene mencionar la cúpula geodésica ideada por Buckminster Fuller y construida por estudiantes del Bengal College of Engineering de Calcuta en 1961 como propuesta para un refugio barato aprovechando recursos locales.

Otro campo poco explorado, pero de gran interés, es el de la combinación con otros materiales.

Una de las más importantes aplicaciones del bambú es como refuerzo del hormigón como ya experimentó H. Chou en el MIT de Harvard en 1914 y cuyos resultados fueron explotados en China en 1918 para la cimentación de puentes de ferrocarril. Su investigación ha proseguido en más de una decena de países con resultados muy positivos. El punto débil de este producto se encuentra en la diferencia de contenidos de humedad de ambos materiales ⁶. El material fué empleado en las Islas del Pacífico durante la II Guerra Mundial tanto por Japón como por EEUU.

Propuestas edificatorias

Se proponen las soluciones constructivas y tipológicas de madera especialmente de los sistemas de entramado ligero y plataforma, pero también de los sistemas adintelados o viga-pilar.

Cimentaciones

Puede ser puntual (pilotes o pilastras de mampostería o bambú) o corrida (zanja rellena de hormigón o murete de bloque) siendo desaconsejable el hincado de pilotes por razones de durabilidad. Por otra parte puede ser superficial o profunda, merced al poco peso de la estructura dependiendo de la capacidad resistente del terreno.

La solera puede ser una losa de hormigón (sobre un dado corrido o simplemente apoyada en el terreno) o un forjado de bambú levantado del terreno con una cámara de aire. El revestimiento o cerramiento de la solera, según sea el caso, tiende a hacerse con entablado machihembrado o tablero hidrófugo.

⁵ Se desarrollaron distintas uniones: de tablero contrachapado abrazando al bambú como un sandwich y pernos de acero, de clavijas de bambú y ataduras vegetales o ensambladuras a caja y espiga más clavija. Las armaduras fueron construidas y ensayadas a escala real con una luz libre de 8m. Curiosamente el colapso de la estructura se produjo en los pares o miembros superiores, no en las uniones, lo que indica que las uniones no son tan complejas de realizar como aparentan.

⁶ Los elementos de hormigón reforzado muestran un incremento de 4 a 5 veces en resistencia a flexión con un porcentaje de refuerzo máximo del 3 al 4% de la sección transversal.



Quincha, sistema de paneles prearmados

En el caso de sistemas viga-pilar se requerirá un forjado más resistente por tener luces mayores que puede ser de hormigón armado con mallazo, etc.

El solado será convencional: losetas, productos vinílicos, tarima, etc.

Muros

Pueden ser portantes o simplemente separadores.

El muro entramado tiene como armazón montantes de bambú y madera unidos en las cabezas con testeros de madera aserrada y separados lo suficiente como para permitir cerramientos de espesores reducidos (entablado, tablero, esterilla de bambú, etc). La separación convencional a ejes es de 50 cm, distancia óptima para evitar el pandeo lateral de la esterilla (1-1,5 cm) y las consiguientes fisuras en el revoco. Como esta separación supone una infrautilización de la capacidad portante del montante se puede acudir a mayores separaciones con esterillas de 2 o más centímetros o bien a una malla metálica más revoco.

El sistema entramado puede ser (como en madera) de plataforma o integral ("balloon frame").

El sistema de viga-pilar utiliza pórticos de secciones grandes (12 cm o más) separados a no más de 3,5 m con cerramientos no-portantes.

Cubierta

Aquí los pares o correas de bambú trabajan excelentemente y los cerramientos de la armadura serán los convencionales: esterilla o 'latas' de bambú, entablado, tablero, planchas metálicas, etc.

Las armaduras, cerchas y jácenas son piezas estructurales eficientes y económicas que permiten la ubicación del aislamiento térmico y más libertad de diseño en el interior.

Cualquier tejado convencional es válido en este sistema, a excepción de la teja cerámica por su excesivo peso.

Carpintería

Al ser el bambú un material de sección variable se desaconseja su empleo en carpintería, aunque en artesanías de alta calidad éstos elementos se realicen sin dificultad.

En el futuro este capítulo constructivo dependerá de los materiales composites derivados del bambú como los laminados y similares.

Instalaciones

Se resolverán en la forma convencional de los entramados ligeros: unificación en muros técnicos, entubado de conducciones, etc.

El diseño con bambú

Como cualquier material el bambú tiene ventajas y desventajas.

Ventajas

- Extraordinarias características mecánicas que le hacen apto para cualquier uso estructural.
- La forma circular hueca lo hace liviano, permite la construcción rápida y es fácilmente transportable.
- Es apto para construcciones sismorresistentes debido a su rigidez y elasticidad que evita su ruptura al curvarse.
- Su mecanización es sencilla y se realiza con herramientas comunes.
- No posee corteza a eliminar ni necesita pulidos o acabados porque dispone de un esmalte natural. Puede recibir acabados de pintrua, barniz, laca, aceites y ceras transparentes.
- Puede emplearse con otros materiales de construcción.
- Tiene bajo costo y altas posibilidades estéticas.

Desventajas

- Presenta variaciones en el diámetro por lo que se dificulta la coordinación dimen-

Muro de baharaque. Tradicional con cámara de aire

sional.

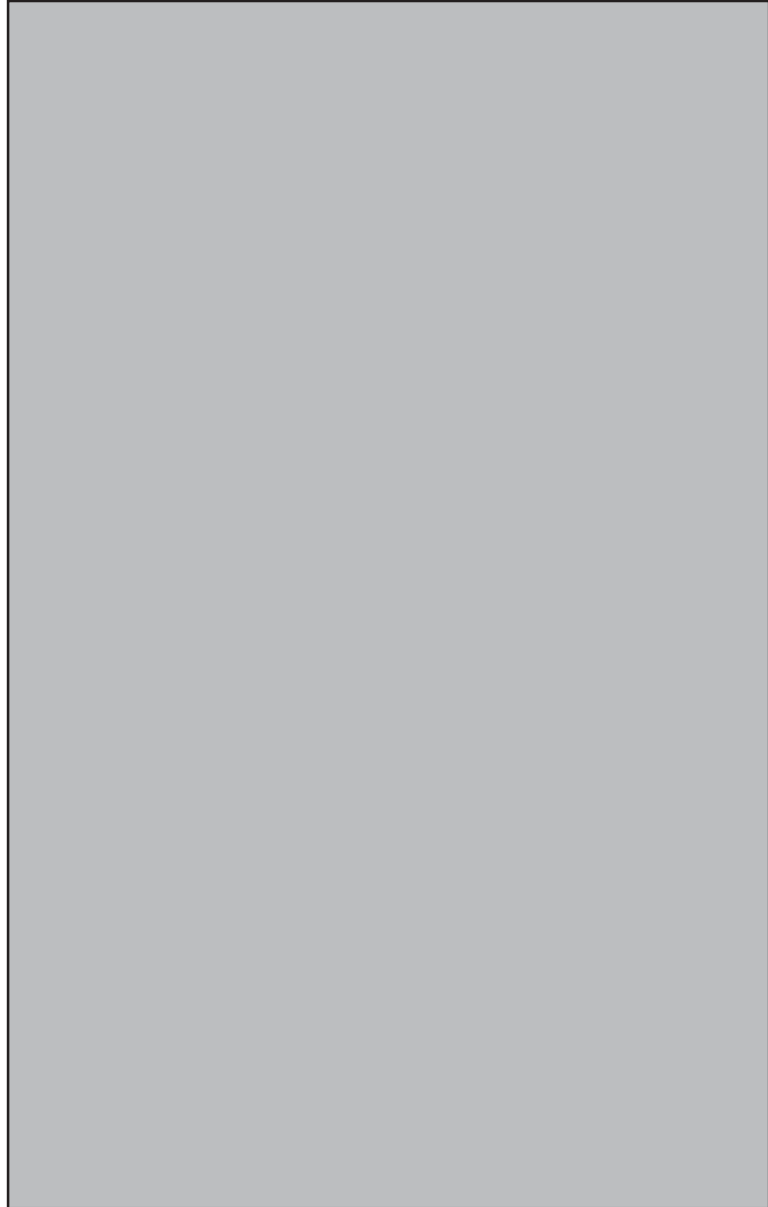
- Puede ser atacado por insectos xilófagos
- Puede pudrirse por la acción permanente de la humedad. Para evitar la subida del agua por capilaridad se emplearán impermeabilizantes tradicionales como alquitranes, láminas bituminosas o de polietileno
- Al secarse se contrae y se reduce su diámetro (presenta problemas especialmente con el hormigón) y en general pierde o gana humedad en equilibrio higroscópico con el medio ambiente. El revestimiento exterior ha de ser estanco al agua y resistente a la humedad además de protegerse con aleros generosos. Los detalles constructivos han de garantizar la ventilación de todos los encuentros y la salida de la humedad de las cavidades si hubieran penetrado (papel asfáltico, etc.).
- Es altamente combustible por lo que requiere una protección por diseño. Normalmente se ha de especificar un revestimiento interior incombustible en los muros.
- Las uniones no pueden hacerse con empalmes como la madera y ha de acudir a piezas especiales de diseño.

Su coordinación modular y los detalles constructivos son importantes para el proyecto y evitan el desperdicio de material:

Los elementos protantes (vigas y pilares) han de coordinarse con los cerramientos, como las esterillas, las cintas o 'latas' de bambú abierto. Se tenderán a definir módulos que dimensionen los productos de tal forma que sean intercambiables. El módulo base recomendado es de 10 cm que ordena las dimensiones más habituales de separación entre montantes (40-60 cm), altura libre entre pisos (240-300 cm) o los pasillos de circulación (90-120 cm).

Las tramas para diseño serán de 2 ó 3MB (Módulo base) y las mediciones se efectuarán a ejes definiendo unas tolerancias que han de ser absorbidas por la junta. Las uniones se pueden realizar con ensamblajes de entalladuras de espiga simple y doble, a bisel, en pico de flauta y en boca de pescado. Las uniones son el 'talón de Aquiles' del bambú ya que no resuelven la anisotropía del material, tienen baja eficiencia, debilitan la sección y dificultan la coordinación dimensional. Los elementos de fijación tradicionales son: fibras naturales de junco, tiras de bambú trenzado, sogas, clavijas de madera, pletinas metálicas, abrazaderas, cartelas de tablero aglomerado y contrachapado, etc.

Los clavos no son recomendables debido al rajado pero en algunas regiones se soluciona colocándolo con incisiones



previas o en caliente.

Los huecos del entramado facilitan la colocación del aislante que en estas latitudes consiste en bagazo de caña, viruta, tierra, aglomerado, etc. aunque en los climas tropicales cobra más importancia la ventilación que el aislamiento.

La corrección acústica se resolverá con los sistemas tradicionales: para frecuencias graves, membranas reflexivas (tablero contrachapado doblando el muro), para frecuencias intermedias, materiales perforados o fibras minerales que actúan

como resonadores y para frecuencias agudas, materiales fibrosos y porosos como fibra vegetal, de vidrio, la madera prensada de baja densidad etc.

En cuanto a su resistencia al sismo las fuerzas de aceleración que éstas provocan a las estructuras están directamente relacionadas con el peso de la edificación. La constitución anatómica tubular le permite absorber la energía de deformación retardando las fallas o roturas. Pero es importante cuidar el arriostamiento y proveer de flexibilidad suficiente a las uniones