Geometrías tejidas con fibras de bambú para su materialización como estructuras estables

Geometries woven with bamboo fibers for their materialization as stable structures

Eugenia Muscio[1], Byron-Sebastián Almeida-Chicaiza[1,2] y Jesús Anaya-Díaz[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (España).
[2] Universidad de Guayaquil. Facultad de Arquitectura y Urbanismo (Ecuador).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9585

1. INTRODUCCIÓN

La complejidad de los elementos que se superponen en la materialización de un objeto o arquitectura conformada por un entramado de fibras se puede describir en la relación sistemática existente entre las siguientes variables: Material – Corte – Entramado – Geometría/superficie – Constructividad (factores físico-constructivos).

Los materiales vienen determinados por unas características propias de resistencia y flexibilidad, que se vinculan directamente a la estructura del objeto final. Las superficies armadas a partir de fibras obtenidas de los cortes del bambú proporcionan diferentes resultados en función de la especie y de la selección anatómica que se realice a partir del corte (cara interna, cara externa o ambas caras de la caña de bambú [1]).

La densidad, cantidad y tipo de haces vasculares (tejidos conductivos), de parénquima (almacenamiento) y de fibras (tejido de sostén) del bambú dan como resultado una determinada resistencia mecánica [2]. La parte externa de la caña de bambú al presentar mayor cantidad de fibras y mayor densidad aumenta su rigidez a diferencia de la cara interior que funciona mejor a compresión. Con lo cual los cortes dan opción a diferentes modos de uso del materia [3].

Por otra parte, los tejidos o entramados realizados con los cortes se pueden considerar nuevos patrones que tienen similitud con los tejidos de la naturaleza, ya que en los dos casos existe una ley intrínseca geométrica.

Las geometrías se determinan mediante su propia génesis y la manifestación de las acciones físicas para su estabilidad (líneas de fuerzas) [4].

De esta manera se establece un nuevo orden "artificial" de fibras que es el entrelazado, existente en todas las escalas, formando siempre relaciones de estabilidad entre las partes.

1.1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS TEJIDOS

En la náutica se puede observar la evolución del uso de las fibras naturales para cordelería y cables. El conocimiento de las fibras en las diferentes comunidades fue dando pie a los avances y nuevos usos vinculados al mundo marítimo. Las primeras representaciones egipcias (4000-3500 a.C.) describen el uso de cordelería vinculados a obras de ingeniería, construcción y navegación y se puede observar también su proceso de generación y producción [5]. La estructura de las cuerdas, cuerpo longitudinal y cilíndrico compuesto por fibras flexibles donde su sección es menor que su longitud, es un conjunto de fibras organizadas habitualmente de forma helicoidal y que trabajan a tracción aumentando su rozamiento interno cuando son sometidas a tensión. Los trenzados son superposiciones de fibras que pueden a su vez estar torsionadas o no, que trabajan de forma conjunta. Las cuerdas pueden ser sencillas o más complejas según el número de cabos que se utilicen [6]. En particular se puede destacar la utilización de tiras de bambú de diferentes dimensiones a lo largo de la historia de la construcción en China, utilizadas conformando, por ejemplo, cuerdas de bambú para remolques, puentes suspendidos o gaviones por su buena resistencia mecánica [7]. Las cuerdas y cables de bambú conformaban tenso estructuras sin piezas metálicas añadidas como es el caso del puente suspendido Quan Xian (S. III d.C). Según indica Bárbaro G. (2007) un cable de bambú de 5 cm de diámetro sometido a tracción puede resistir hasta 4 toneladas de carga [8]. Los cables se componen por 3 o más cuerdas torsionadas sobre sí mismas (aumentando así el coeficiente de fricción) y trenzadas entre sí, donde las fibras interiores se componen de cortes de la cara interna del bambú que al entrar en tensión la cuerda las comprimirá aumentando la fricción interna. Por el contrario las fibras externas de la cuerda se obtienen de los cortes que aíslan la cara externa del bambú para proteger el conjunto y por tener mayor resistencia mecánica [8]. López Hidalgo (2003) explica en sus es-

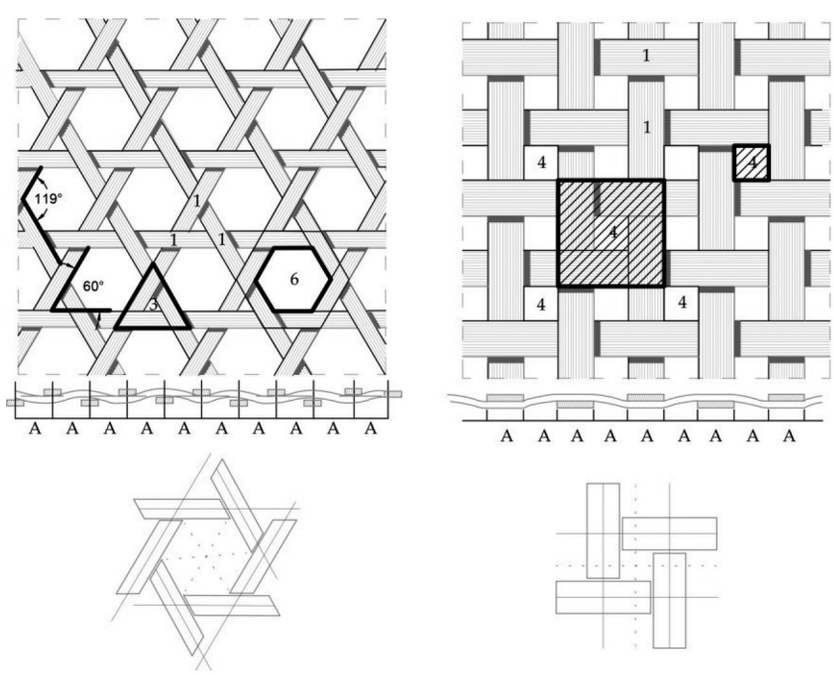


Fig. 1: Representación de tejidos: hexagonal (izquierda) y ortogonal (derecha)

Cod. 9585 | Tecnología de materiales | 3312.99 Otras

tudios que las cañas de bambú utilizadas en China para la construcción de cuerdas fueron bambúes jóvenes que daban mayor flexibilidad a los cortes. En los resultados obtenidos de los ensayos que realizó con las cuerdas utilizadas en el río Yangtse se pudo observar que las cuerdas sometidas a tracción alcanzaban los 1800 kg/cm^2 antes de llegar a la rotura de las fibras interiores más tiernas [9].

El tejido de gaviones es una de las técnicas más tradicionales de la ingeniería hidráulica de Asia, en particular de China. Realizados con tejidos hexagonales (Figura 1) a partir de los cortes de la cara externa de la caña de bambú que presenta mayor contenido en sílice y mayor gravedad especifica. Son elementos constructivos permeables, que requieren resistencia a fricción [7]. Se realizaban geometrías de forma cilíndrica u ovalada, con tejidos hexagonales cuyas aberturas debían ser de menor tamaño que las piedras que albergaban dentro. El solape de los cortes de bambú (las tiras) alcanza unos 30 cm y en algunas ocasiones los nudos de entrelazado se reforzaban con atados de otras fibras.

López Hidalgo (2003) indica que la longitud utilizada hoy en día más común es de 60 pies para gaviones entrelazados con bambú [9].

Otra de las técnicas tradicionales de tejidos con bambú es la quincha o bahareque, que se puede encontrar en Asia, África y América del sur principalmente. Son entramados planos que construyen cerramientos, tanto descubiertos como recubiertos por barro conformando un muro. Esta técnica constructiva se conoce con diferentes nombres según su origen, pero se mantienen los mismos principios de armado. Muchas veces requiere de un marco estructural que rigidiza el tejido. Son entrelazados con tramas realizadas con cortes de 1/4 de caña de bambú (puede variar según la especie de bambú ya que cambia su diámetro total) y urdimbres de 1/4, 1/2 o caña entera. La resistencia mecánica requerida para la urdimbre debe ser superior a la de la trama, ya que recibe mayores esfuerzos por constituir el entramado [10].

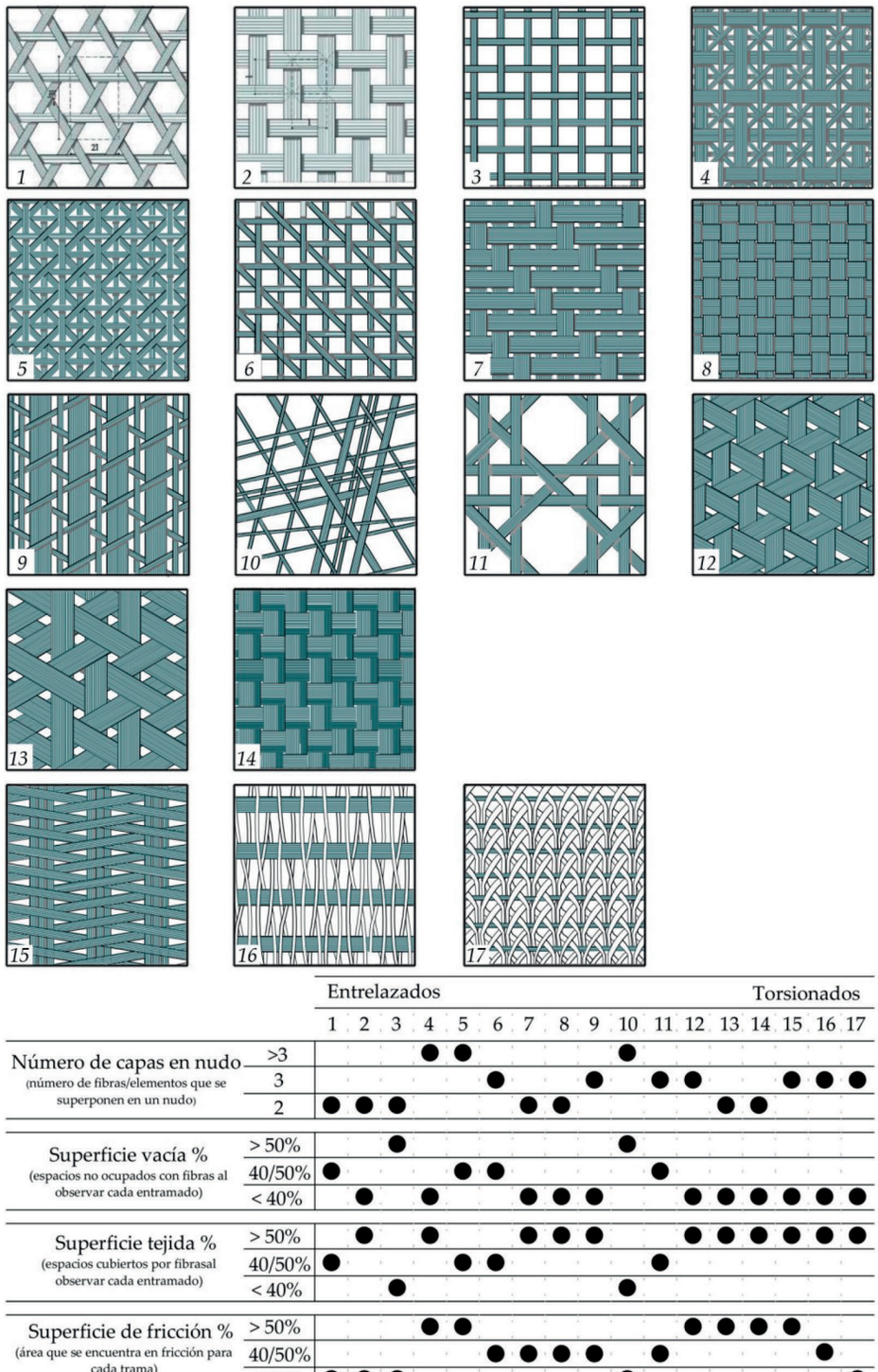


Fig. 2: Estudio comparativo - análisis gráfico de entramados. Resumen de los datos obtenidos de una misma superficie de muestra

1.2. EL BAMBÚ

Al trabajar con un material vegetal las características de resistencia mecánica dependerán de la especie y del corte que se realice ya que estos factores están determinados por la disposición anatómica [1]. En el caso del bambú las fibras se disponen de forma longitudinal a lo largo de la caña y la presencia de nudos, a modo de interrupciones, son rigidizaciones consecuencia del cambio en la dirección de las fibras. Las distintas especies de bambú que presentan a su vez sus características anatómicas particulares las hacen idóneas para diferentes usos.

Realizando un corte horizontal a la caña de bambú se puede observar mayor densidad de haces vasculares en el borde externo y que van disminuyendo hacia el interior de la caña y al revés en relación con el parénquima que tiene menor presencia hacia la cara externa. Las fibras que rodean los haces vasculares otorgan gran resistencia a tracción a la caña de bambú [1] y tienen mayor longitud cuanto más cerca a la cara externa de la caña estén.

1.2.1 El bambú asiático

Los bambúes asiáticos son especialmente idóneos para el desarrollo de entrelazados por presentar rizomas leptomorfos o monopodiales lo que facilita su separación en tiras y la realización de subdivisiones mediante cortes, esto es por la distribución conjunta de fibras en vainas

a lo largo de la caña [1]. En particular la especie de bambú *Phyllostachys bambusoides*, que se la conoce como *Madake*, es un bambú muy utilizado principalmente en Japón y China hasta la actualidad para la constitución de cestería ya que alcanza los 40 cm de distancia entrenudos y hasta 15 cm de diámetro.

1.3 TEJIDOS Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Según el número de tiras o fibras que se entrelazan se pueden clasificar como biaxiales o triaxiales [11], lo que varía a su vez el nudo de entrelazado y las superposiciones de capas. De forma global se pueden clasificar en tejidos de base ortogonal y tejidos triangulados o de base hexagonal. La propia geometría del tejido determina la curvatura admisible del conjunto y condiciona la flexibilidad que requiere el material para desarrollarse. Los tejidos hexagonales son geométricamente triángulos regulares y hexágonos alternados, con una triangulación otorga estabilidad al conjunto (figura 1) y con ángulos entre fibras de 60° y 120° formando nudos de entrelazado con superposiciones de dos capas de cortes de bambú que responden a un ritmo de cruce (1/1/1) (una fibra pasa por encima de otra fibra) y ritmo de tejido (3,6,3,6) lo que significa que cada vértice está rodeado geometrías con tres lados y seis lados: de un triángulo, un hexágono, un triángulo y un hexágono como orden de teselación geométrica [4][12].

Los entrelazados ortogonales con fibras cruzadas a 90° tienen nudos con dos capas superpuestas, pero con menor superficie de superposición que en los tejidos hexagonales al no presentar inclinación. Tienen un ritmo de cruce (1/1/1) (cada fibra pasa por encima de una fibra) y un ritmo de tejido (4/4/4/4) ya que cada vértice se rodea de geometrías de cuatro lados (figura 1).

A partir de la selección de tejidos realizada por López Hidalgo (2003), descartando los entramados que presentaban complejidad para su construcción a escala arquitectónica, se realizó un estudio gráfico de 17 entramados. Dicho análisis dio como resultado un cuadro resumen que permitió comparar la superficie de fricción, los porcentajes de superficie tejida y vacía y conocer el número de capas superpuestas (Figura 2).

Se observa que la mayor parte de los casos de estudio la superficie de fricción es igual al 50% del tejido o mayor, dato que se obtuvo como resultado del ancho de la fibra utilizada en la muestra y el número de capas superpuestas. Siete de los diecisiete casos estudiados presentan cruces de dos fibras en los nudos de entrelazado.

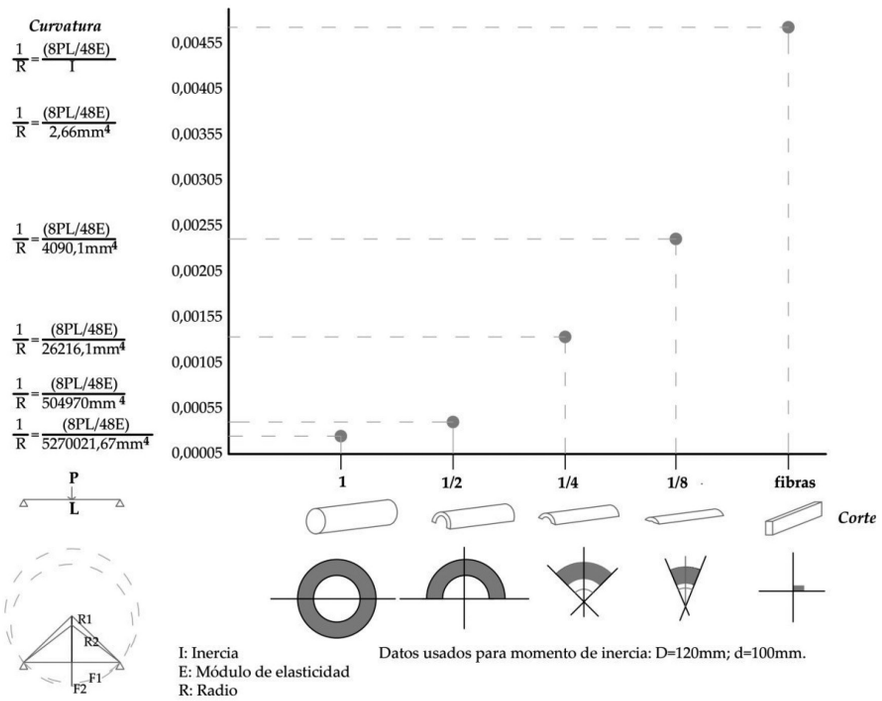


Fig. 3: Estudio analítico de la curvatura admisible según el corte de la caña de bambú, teniendo como dato el momento de inercia Ix del corte realizado

1.3.1. Los cortes tipo que posibilitan la constitución de tejidos

El primer análisis se establece vinculando el comportamiento mecánico/constructivo con la anatomía general del bambú a partir de los cortes determinando su mejor respuesta mecánica [13].

López Hidalgo (2003) describe que Bauman (1912) fue de los primeros en estudiar la diferencia en la resistencia mecánica entre las caras de la cañas de bambú obteniendo como resultado que la resistencia a tracción de la cara externa de un bambú *Phyllostachys nigra* era de 3.068 kg/cm^2 y de la cara interior era de 1.594 kg/cm^2 [9]. Estos resultados tienen su origen en la composición anatómica de cada una de las caras del bambú, favoreciendo su resistencia a tracción en la cara externa y su resistencia a compresión en la cara interna.

A su vez el corte de la caña según la altura varía su resistencia mecánica. La cepa, la parte media y el ápice (la parte más alta de la caña) se diferencian por su distancia entre nudos y por la presencia de mayor o menor haces vasculares y fibras relacionados con el grosor de pared que es cónico en las cañas de bambú. Es por esto que la cepa es más propicia para soportar esfuerzos a compresión presentando menor distancia entre nudos, mayor grosor de pared y diámetro de caña. En la parte media de la caña aumenta la distancia entre nudos y disminuye progresivamente el diámetro de la caña, lo que lo hace propicio para esfuerzos a tracción. El ápice tiene mayor distancia entre nudos, y el diámetro es menor siendo la parte más flexible de la caña de bambú.

Mediante el análisis de radio de curvatura / tipo de corte (Figura 3), se establecieron las posibilidades que ofrece un bambú determinado según el corte que se realice para ser utilizado en la generación de superficies espaciales (teniendo en cuenta la geometría del corte, no su condición anatómica). Se definió la curvatura como la inversa del radio de curvatura y se dejaron las variables de la carga (P), la longitud del corte (L) y módulo de elasticidad del bambú (E) sin datos concretos, estableciendo un método de análisis abierto. Se consideró como dato un bambú con diámetro 120 mm (D) y con diámetro interior 100 mm (d) con los cuales se estableció como punto de partida la obtención de los momentos de inercia (Ix) de los diferentes cortes de la caña planteados en el análisis (caña entera:1, 1/2, 1/4, 1/8, menor que 1/8). La gráfica resultante muestra una diagonal ascendente a mediada que el corte de la caña tiene menor sección favoreciendo la curvatura. También se puede observar un salto cuantitativo en referencia a la curvatura admisible entre los cortes de 1/2 de caña y 1/4 de caña que puede tener que ver con el momento de inercia y la geometría del corte que pasa a ser más plano.

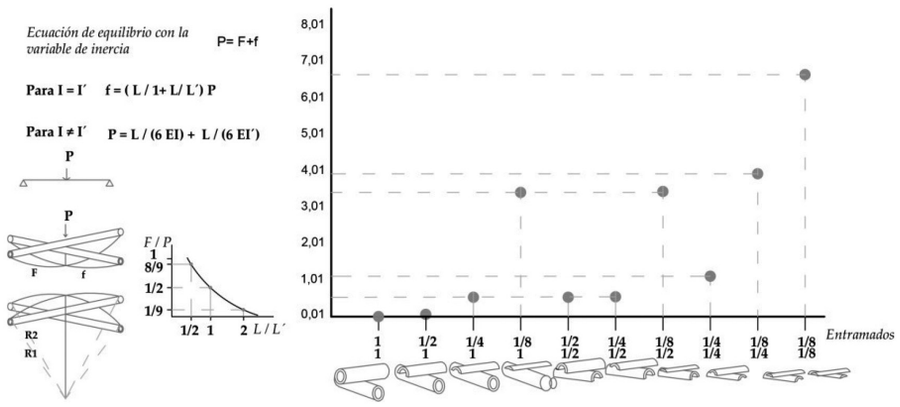


Fig. 4: Estudio analítico de la flecha admisible según los cortes superpuestos de la caña de bambú. Siendo L: Longitud del corte, L´: Longitud del corte 2, P: Carga puntual, E: Módulo de elasticidad del bambú analizado, I: Momento de Inercia del corte, I´: Momento de Inercia del corte2. Teniendo como dato el momento de inercia Ix del corte realizado de un bambú diámetro exterior (D):120 mm y un diámetro interior (d): 100 mm

características ideales de cantidades / grados para obtener mejor respuesta en la construcción de entramados

Aspectos de la anatomía del bambú	Bajo	Medio	Alto
Módulo de elasticidad de la planta	●		
Fibras de la planta			●
Parénquima	●		
Longitud de fibras de la planta			●
Gravedad específica			●
Distancia entre nudos de la planta			●
Ancho de pared de la planta	●		
Diámetro de la caña		●	
Fibras en vainas de la planta (rizomas leptomorfos)			●

Fig. 5: Aspectos anatómicos del bambú. Características ideales de cantidades/grados para obtener mejor respuesta en la constitución de entramados

1.4. SUPERPOSICIÓN DE CORTES EN FIBRAS DE BAMBÚ

Otra variable que se presenta es la relación entre la superposición de cortes y la flecha admisible. Se pudo evaluar teniendo como parámetro el momento de inercia (Ix) de cada corte en particular y realizando una estimación utilizando la ecuación de equilibrio considerando para el cálculo los mismos datos que se describen en la Figura 3. En el siguiente estudio se tiene en cuenta exclusivamente la geometría del corte, y no hace referencia a la anatomía del bambú (Figura 4). Se puede observar que la se produce un salto en la gráfica cuando los cortes de 1/8 de caña de bambú se analizan con otro corte de bambú, al disminuir su momento de inercia (Ix).

2. ESTUDIO ANALÍTICO

Anatómicamente son muchos los aspectos que definen un género y/o una especie de bambú y se pueden particularizar las características mecánicas de cada uno de ellos. A modo de resumen las características más destacadas sobre la anatomía del bambú que hacen referencia a cuestiones de interés vinculadas a la constructividad de entramados se pueden observar en la Figura 5.

La metodología de análisis se realizó distinguiendo tres niveles: bajo, medio y alto, en cuanto a la cantidad e índice que dará la respuesta más favorable en la constitución de entramados.

El módulo de elasticidad, que es una característica propia de la especie, incide directamente en el radio de curvatura admisible del corte de la caña (tal como se explica en la fórmula de la Figura 3 la relación entre estos dos aspectos es inversamente proporcional). Esto afecta también a la curvatura del nudo de entrelazado y puede ser una de las variables que determine el tipo de tejido susceptible de ser constituido con determinada especie de bambú. Por estas razones se indica en la figura 5 que el módulo de elasticidad cuanto menor sea más fácil será realizar el tejido.

El porcentaje de fibras y parénquima presentes en las caras de la caña de bambú varía la resistencia a tracción o compresión. Las fibras dispuestas en dirección longitudinal otorgan resistencia mecánica, favorecen el trabajo a tracción y la curvatura de las tiras. El parénquima absorbe la compresión.

La longitud de fibras y la distancia entre nudos de una caña facilitan la realización de cortes y dan mayor flexibilidad admitiendo más curvatura.

La gravedad específica es la densidad de fibras por área (0,5 – 0,9 gr/cm^3 [9]), cuanto mayor es mayor será su rigidez.

Las distintas especies se constituyen con diferentes anchos de paredes, cuanto menor es su ancho, mayor densidad de fibras habrá, o sea que la cara externa prevalecerá frente a la interna.

Por otro lado, el estudio de los tejidos con fibras de bambú se puede establecer en dos escalas analíticas: la escala general de la geometría y la escala de detalle del nudo de entrelazado; en los dos casos se estudia la curvatura requerida para poder constituirlo. Vinculando los cortes del bambú, los nudos de entrelazado y las curvaturas admisibles se obtiene un primer acercamiento a la superposición de las fibras que lleva implícita una curvatura a escala de detalle. El comportamiento del material en relación al nudo de entrelazado, que es el punto del tejido donde se superponen dos o más fibras, requiere de una curvatura en su cruce. Para su estudio se puede determinar que existe una distancia entre fibra y fibra que dependerá del patrón de entrelazado y de la superposición de capas de fibras que conlleve. Conociendo dicha distancia se puede determinar si la especie de bambú utilizada y el corte realizado admiten la curvatura necesaria para realizar el entrelazado deseado.

3. RESULTADOS

Se relacionaron gráficamente los datos obtenidos en el estudio analítico de la flecha admisible según los cortes superpuestos de la caña de bambú (Figura 4), los patrones de entramado hexagonal (Figura 1, izquierda), ortogonal (Figura 1, derecha), irregular y torsionado, además de las superficies admisibles. Se puede observar que los patrones de entramado hexagonal y ortogonal presentan la misma jerarquía entre tramas (fibras que se entrelazan o fibras activas) y urdimbres (fibras rígidas sobre las que pasan las tramas o fibras pasivas). El tejido irregular al ser un entrelazado sin orden se va adaptando a la superficie que se busque construir dando estabilidad por densidad y fricción. El tejido torsionado canónico utiliza diferentes condiciones entre la trama y la urdimbre, una requiere mayor flexibilidad y la otra requiere mayor resistencia mecánica para soportar la tensión del entramado y permanecer estable.

Los entramados hexagonal y ortogonal presentan mayor facilidad de entrelazado con los cortes de bambú de 1/4 de caña hasta 1/8 de caña, ya que estos dos patrones presentan un ritmo continuo de nudos de entramado lo que hace que se requieran cortes con mayor curvatura admisible, más aún cuando aumenta la densidad de fibras en el tejido. Los entramados torsio-

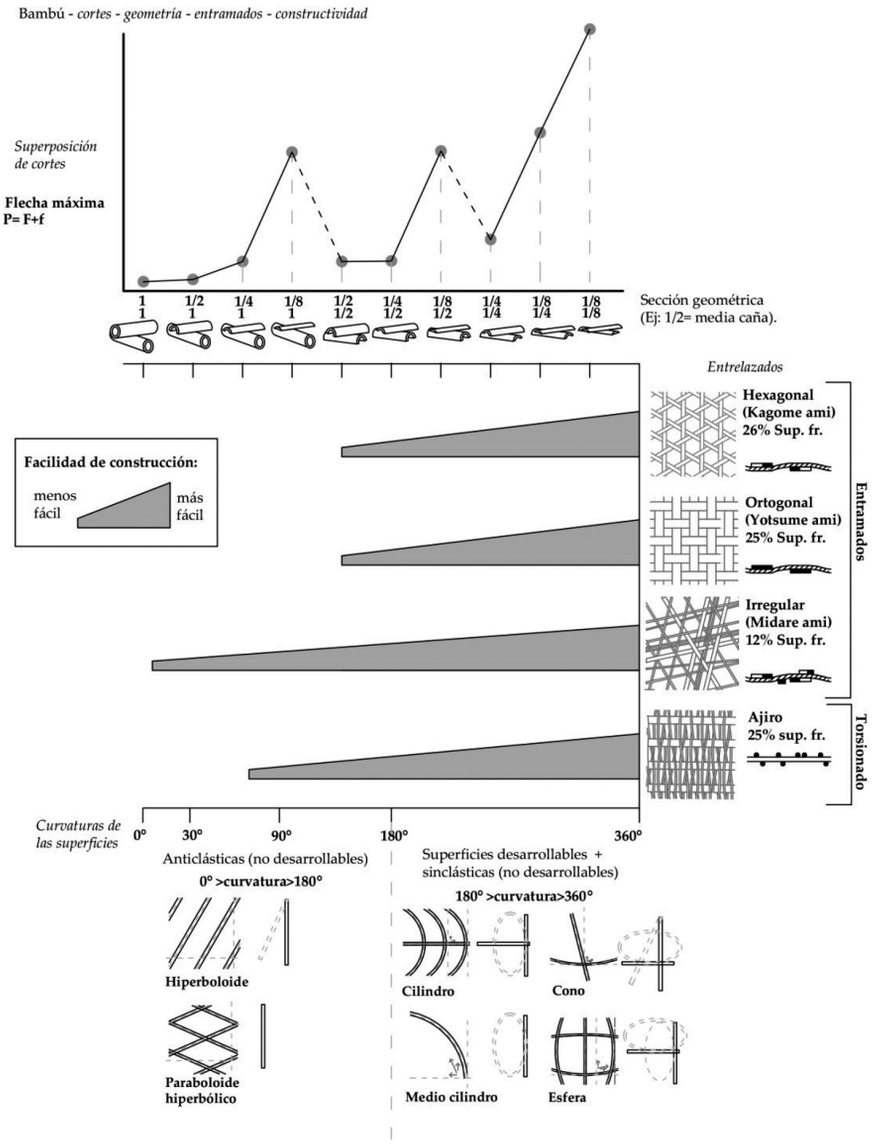


Fig. 6: Relación entre la flecha máxima de los cortes de bambú formando una superposición a modo de entramado, los tejidos y las curvaturas en las superficies

nados admiten mayor variedad de cortes ya que sus fibras requieren por un lado flexibilidad y por otro lado resistencia. En referencia a las superficies no desarrollables (anticlásticas) las cuales pueden ser regladas admiten cañas sin curvatura para poder ejecutarse, por lo tanto mayor variedad de cortes y entrelazados. Se representan también las superficies desarrollables y sinclásticas (superficies no desarrollables en las cuales tienen una misma curvatura para todos sus puntos) en las cuales se necesita curvatura de los cortes de bambú para poder ejecutarse.

4. CONCLUSIONES

Es posible conocer las variables y sus relaciones en la constitución de un entramado a cualquier escala mediante el estudio de las diferentes partes que interfieren en la materialización de un tejido con fibras de bambú.

Se puede concluir que la selección del género y de la especie de bambú para realizar una estructura estable con entrelazado o tejido es uno de los primeros pasos para definir el comportamiento estructural final de una superficie espacial tejida. La información sobre el tipo de rizoma, el módulo de elasticidad de la especie de bambú, la longitud de fibras de la planta y la distancia entre nudos del bambú influyen en la respuesta mecánica de los cortes. Se realiza de este modo una selección del material natural bajo un criterio científico.

Los cortes, además de determinar la resistencia de la fibra obtenida, definen los radios de curvatura mínimos que estos admiten y teniendo en cuenta la distancia entre urdimbres se puede determinar si el patrón de entramado es posible de ser utilizado. El análisis de la superposición de cortes de bambú muestra que existen saltos en la flecha admisible según sea la combinación de cortes (1, 1/2, 1/4, 1/8) para formar el entramado teniendo en cuenta el momento de inercia de los cortes.

Se plantea como siguiente objetivo de análisis el estudio comparativo del comportamiento estructural de tejidos con patrón hexagonal y tejidos con patrón ortogonal, mediante un software de cálculo, para identificar los esfuerzos de las fibras y los desplazamientos que se producen en el conjunto.

REFERENCIAS

[1] X. Londoño, "Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo," Cátedra Maestria en Construccion. Módulo Guadua, Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2002.

[2] B. S. Almeida, E. Muscio, L. Iparreño, and J. D. Anaya, "Panel prefabricado de guadua-acero-mortero microvibrado con ceniza de cáscara de arroz para vivienda de interés social.," Anales de la Edificación, 2019. Doi: http://dx.doi.org/10.20868/ade.2019.3914.

[3] E. Obataya, P. Kitin, and H. Yamauchi, "Bending characteristics of bamboo (Phyllostachys pubescens) with respect to its fiber–foam composite structure," Wood Science and Technology, vol. 41, no. 5, pp. 385–400, 2007. Doi: http://dx.doi.org/10.1007/s00226-007-0127-8.

[4] T. Tarnai, "Baskets," in Proc. of the IASS-APCS 2006 Int. Symp. New Olympics New Shell and Spatial Structures. Beijing, China, 2006. (Beijing University of Technology), 2006.

[5] J. Evans and I. Ridge, "Rope and rope-like structures," WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, vol. 20, 2005. Doi: http://dx.doi.org/10.2495/978-1-85312-941-4/07.

[6] C. A. Giner, Tejido y cestería en la Península Ibérica: historia de su técnica e industrias desde la prehistoria hasta la romanización, vol. 21. Instituto Español de Prehistoria, 1984. ISBN 84 00 05710 4.

[7] J. Needham, Science and civilisation in China. 4: Physics and physical technology: 3. Civil engineering and nautics. Cambridge University Press, 1971.

[8] G. Barbaro, "Transformación e industrialización del bambú," QEJ. Bricojardinería & paisajismo: Revista profesional de distribución en horticultura ornamental y jardinería,(155), pp. 8–15, 2007.

[9] O. H. Lopez, Bamboo: The gift of the gods. O. Hidalgo-Lopez, 2003.

[10] C. Stevens, Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications, vol. 10. John Wiley & Sons, 2010.

[11] P. Puig, Shan, and Ivelich, "Cool weaving urban furniture withcevapore cooling effect," Obuchi Laboratory.Univrsity of Engineering. University of Tokyo, 2014.

[12] T. Tarnai, F. Kovács, P. Fowler, and S. Guest, "Wrapping the cube and other polyhedra," Proc. R. Soc. A, vol. 468, no. 2145, pp. 2652–2666, 2012. Doi: http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2012.0116.

[13] E. Muscio and J. D. Anaya, "Estudio de los radios de curvatura mínimos de los cortes de bambú. Análisis experimental con Phyllostachys bambusoidesSieb. et Zucc.," 2018. Doi: http://dx.doi.org/10.20868/ade.2018.3848.