UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

**GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y NUDO EN LA CONSTITUCIÓN DE
SUPERFICIES DE ENTRAMADOS ESPACIALES CON FIBRAS DE BAMBÚ**

Tesis Doctoral

Eugenia Muscio

ARQUITECTA

2020

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas

**GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y NUDO EN LA CONSTITUCIÓN DE
SUPERFICIES DE ENTRAMADOS ESPACIALES CON FIBRAS DE BAMBÚ**

Tesis Doctoral

Eugenia Muscio
ARQUITECTA

Director:
Jesús Anaya Díaz
Doctor Arquitecto

2020

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 20....

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20....
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Me gustaría agradecerle a Jesús Anaya Díaz, mi Director de Tesis, por ayudarme a encauzar mi búsqueda, por compartir sus conocimientos y por todas las preguntas que él me planteó durante esta investigación que fueron el motor de avance.

Quiero agradecer a los miembros del Tribunal y a los Doctores que realizaron los informes por aportar su tiempo en la lectura de este documento y sus conocimientos.

A Jorge Morán Ubidia (Ecuador), Ingemar Saevfors (Holanda), Manuel Macía (España), José Eduardo Torres Rojas (España - Colombia), Ximena Londoño (Colombia), Sabino Rua (Timor Laeste), Jed Long (Australia), Jorg Stamm (Colombia - Alemania), Sara Beatriz Guardia (Perú) quienes comparten el mismo interés que yo en el estudio de este material y/o los tejidos con fibras. Todos me ayudaron personalmente a desarrollar esta investigación.

A Tibor Tarnai (Holanda) y Alison Grace Martin (EE.UU.) por todo el trabajo de investigación con respecto a los tejidos y las geometrías experimentales que realizan, y por su dedicación en resolver mis dudas, cuyas explicaciones me sirvieron para comprender mejor sus investigaciones.

Gracias a mis compañeros de doctorado por todo lo que me enseñaron estos años. Especialmente quiero agradecer a Andrés Rodríguez, a Luis Borunda, a Bayron Sebastián Almeida, a María Dolores Álvarez Alipe por ayudarme a avanzar con sus conocimientos.

A Doctorandos Anónimos por hacer de la sala de investigación de la ETSAM el espacio de reflexión más internacional de la escuela y con quienes viajé sin salir de allí.

A Carlos López Bragaña y a Francisco Muscio siempre presentes.

A Miguel por su inagotable ayuda, su exigencia que me ayuda a crecer y por su compañía, es poco esta tesis para agradecerte toda tu dedicación. A Alejo, por todo lo que aprendí en los ratos de descanso juntos, gracias por haber cambiado mi concepto del tiempo.

A mi familia por haberme acercado el libro de cestería japonesa entre jarrones chinos y tejidos que me generaron tantos pensamientos.

A mis padres por las inolvidables tardes que compartimos durante el último año. Muy especialmente a mi mamá.

Gracias a Ases y a Alba.

A mis amigos.

INDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	VII
1.1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE LA TESIS	15
1.2. JUSTIFICACIÓN	21
1.3. HIPÓTESIS	21
1.4. OBJETIVO	23
1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS Y METODOLOGÍA	23
1.6. ESTADO DEL ARTE	31
 CAPÍTULO 2 EL BAMBÚ	
2.1. ETNOBOTÁNICA	45
2.2. ESTUDIO DE TAXONOMÍA Y ANATOMÍA DEL BAMBÚ	45
2.2.1. Taxonomía	47
2.2.2. Cronología de la clasificación taxonómica del bambú	53
2.2.3. Patrones de distribución geográfica	61
2.2.4. Anatomía del bambú	63
2.2.5. Propiedades químicas	77
2.2.6. La preparación del material vegetal para el trabajo en construcción	79
2.2.7. Cambios que se producen en el proceso de crecimiento	81
2.2.8. Relación entre las condiciones anatómicas de la caña y las propiedades mecánico - físicas	85
2.3. LA DISPOSICIÓN PROPIA DE LAS FIBRAS	91
2.3.1. Concepto de fibra y la disposición de las fibras del propio elemento vegetal	91
2.3.2. La disposición artificial de las fibras en la constitución de entramados	93
2.4. ESPECIES PRIORITARIAS DE BAMBÚ. CRITERIOS INBAR	93
2.4.1. Criterio de selección de especies	95
2.4.2. Características de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	105

CAPÍTULO 3 LOS CORTES EN FIBRAS DEL BAMBÚ

3.1.	LOS CORTES DEL BAMBÚ	111
3.1.1.	Tipologías de corte del bambú	111
3.2.	TIPOLOGÍAS DE CORTE SEGÚN LOS USOS	117
3.2.1.	Cortes realizados para laminados	117
3.2.2.	Cortes realizados para formar cuerdas de bambú	121
3.2.3.	Cortes realizados para formar gaviones	123
3.3.	OBTENCIÓN DE FIBRAS Y MANIPULACIÓN DE LAS FIBRAS	125
3.3.1.	Evolución de las herramientas y maquinaria para la realización de cortes	125
3.4.	ASPECTOS FÍSICOS Y RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS FIBRAS DE BAMBÚ	129
3.4.1.	La influencia de la edad de corte en el uso	129
3.4.2.	Estudio de la caracterización anatómica en base a la escala del corte y la zonificación de los cortes de la <i>Guadua angustifolia</i>	131
3.4.3.	El curvado	133
3.4.4.	Experimentación: Radio mínimo de curvatura según el corte	135
3.4.5.	La tensión de flexión de las fibras de bambú	143
3.4.6.	Esfuerzo cortante y el coeficiente de Poisson	149

CAPÍTULO 4 LOS ENTRAMADOS Y LA GEOMETRÍA DEL ESPACIO

4.1.	TEJIDO Y GEOMETRÍA EN LA NATURALEZA	153
4.1.1.	Las construcciones tradicionales de bambú con presencia de entramados	155
4.2.	TÉCNICAS DE ENTRAMADOS	163
4.2.1.	El uso histórico del entramados con fibras naturales	163
4.2.2.	Entramados según el patrón geométrico	169
4.2.3.	Entramados envolventes del cubo y otros poliedros	171
4.2.4.	Entramados envolventes de geometrías desarrollables (simple curvatura) y no desarrollables (sinclásticas)	175
4.2.5.	Relación entre la curvatura y la distancia de las fibras de un tejido	179
4.3.	LA NOMENCLATURA EN LA IDENTIFICACIÓN DE ENTRAMADOS	181
4.3.1.	Símbolo de Schläfli	181

4.3.2.	Notación de los tejidos biaxiales	181
4.3.3.	Rotación de las celdas	183
4.3.4.	Períodos binarios en patrones biaxiales	183
4.4.	ESTUDIO GRÁFICO DE PATRONES DE ENTRAMADO	185
4.5.	LA ALTERACIÓN DE LOS PATRONES DE ENTRELAZADO EN ZONAS CONCRETAS DE LAS SUPERFICIES GEOMÉTRICAS	229
4.5.1.	El cambio del tejido horizontal al vertical	229
4.5.2.	El tejido de borde	229
4.5.3.	Tejidos de esquina	231
4.6.	NUDOS DE ENTRAMADO	231
4.6.1.	Coeficiente de fricción entre fibras del nudo de entramado	233
4.6.2.	Los nudos de entramado y el corte de la fibra	235
4.6.3.	Los nudos de entramado y la geometría de corte	237
4.6.4.	Empalmes o empates de fibras	241
4.7.	TIPOLOGÍAS DE TEJIDOS PARA USO EN CONSTRUCCIÓN	243
4.7.1.	La cuerda	243
4.7.2.	Cables de bambú	249
4.7.3.	Los tejidos de gaviones	251
4.7.4.	Los tejidos planos para utilizados en cerramientos	255
4.8.	GEOMETRÍA DEL ELEMENTO	259
4.8.1.	La escala	261
4.8.2.	Las geometrías y los entramados	265
4.8.3.	La geometría helicoidal	275
4.9.	LAS PROPIEDADES DE LAS SUPERFICIES	275
4.10	SISTEMAS GEOMÉTRICOS INTERPRETADOS CON BAMBÚ	279
4.11	ESTRUCTURA Y GEOMETRÍA	285
4.10.1.	Los estudios sobre estructura y geometría de B. Fuller	287
4.10.2.	Las estructuras ligeras de Frei Otto	291
4.10.3.	La construcción actual de geometrías complejas mediante entramados para la con-	

formación de espacios arquitectónicos	295
4.10.4. Fabricación digital para el desarrollo de tejidos en arquitectura	305

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS VINCULADOS

5.1. RESULTADOS Y OBSERVACIONES	323
5.1.1. Análisis de variables	325
5.1.2. Estudio comparativo de los modos de comportamiento estructural de las configuraciones geométricas, de entramados y de nudos	355
5.1.3. Familias o patrones de comportamiento estructural	509
5.1.4. Estudio en detalle de los nudos de entramado de los casos analizados	515

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES	523
6.2 PERSPECTIVAS E INVESTIGACIONES FUTURAS	531
BIBLIOGRAFÍA	547
ANEXOS	565

RESUMEN

La construcción de las arquitecturas contemporáneas se está caracterizando desde el comienzo de siglo XXI por la utilización de diseños definidos mediante superficies rígidas de geometrías complejas y formas libres. Esta Tesis Doctoral se plantea como Hipótesis el demostrar que tales superficies son susceptibles de resolverse mediante tejidos constituidos con fibras naturales de bambú (en esta tesis doctoral se considera fibra a la parte mínima del bambú obtenida a partir del corte para la configuración de entramados) obteniendo una solución constructiva con elevado nivel de resistencia, gran capacidad definición formal, cuya configuración como láminas estructurales ligeras se puedan resolver mediante elementos constructivos auto portantes, producidos con fibras de corte característico, patrones geométricos de tejido y condiciones del nudo de entrelazado. Y cuya capacidad de ensamblado permita la conformación de formas estructurales continuas mediante teselación geométrica.

La utilización de materiales vegetales naturales como las fibras de bambú, que se define en este estudio como la parte mínima del bambú obtenida a partir del corte de la caña para conformar un entrelazado, en la construcción otorgan gran versatilidad de uso. Las características mecánicas de las superficies entramadas continuas y geometrías complejas rígidas obtenidas a partir de las fibras dependerán de las particularidades de la especie de bambú, el corte empleado y el patrón de entrelazado.

Para la confirmación de la Hipótesis se estableció como objetivo identificar morfogénicamente la relación entre especies de bambú, tipos de corte de bambú vinculados a patrones de entramado planos, definición de nudos de entramado y su capacidad de configurarse como superficies características continuas de geometrías de formas libres.

Esta tesis plantea el estudio analítico de una de las más antiguas técnicas de unión de bambú como son los entramados. Tejidos que por fricción forman estructuras rígidas y ligeras. Son superficies armadas a partir de fibras obtenidas de los cortes del bambú con las que se obtienen diferentes resultados en función de la especie y la selección de los cortes. Se aborda el estudio de los tejidos con fibras de bambú, sus patrones geométricos de entrelazado y las geometrías admisibles para la constitución de superficies tejidas. El estudio analítico del

entrelazado y de la geometría que da origen al tejido permiten conocer la posibilidad de realizar superficies de doble curvatura. Por otro lado, los cortes del bambú se relacionan directamente con el grado de flexibilidad de las fibras y la resistencia mecánica para realizar los entrelazados. En este estudio analítico se interpreta la relación entre la geometría de una superficie, el patrón geométrico de entrelazado y las características biomecánicas del corte de las fibras de bambú para establecer los criterios de estabilización de superficies de doble curvatura en función de la distancia de nudos de entrelazado de fibras, la densidad de fibras en el tejido y los tipos de corte del material definidos por su radio de curvatura mínimo admisible.

La metodología de trabajo de esta investigación fue clave para llegar al objetivo de este estudio analítico. La metodología empleada se basa en un triedro que se define por tres aspectos como son la geometría, la estructura y la forma, que condicionan la capacidad de originar superficies. Puntos de análisis vinculados a los cortes en fibras del bambú, a su anatomía, a la disposición de las fibras para configurar un tejido y a los nudos de entramado. Se buscó relacionar y contrastar la información y los datos obtenidos mas significativos de cada uno de las partes que interfieren en la constitución de entramados espaciales con fibras de bambú estudiados en los diferentes capítulos. Se estudiaron las correspondencias entre datos dos a dos hasta obtener interrelaciones de hasta cuatro datos para llegar al objetivo planteado. Por último, se realizó un estudio de casos analizando del comportamiento mecánico mediante el programa Simscales que discretiza el volumen por el algoritmo OpenFoam, el cual al trabajar con uniones o intersecciones de líneas considera los nudos rígidos y fusiona el material en una única superficie. Suponiendo una estructura de fibras tejidas en equilibrio con nudos comprimidos que alcanzan la rigidez en esos puntos del entramado al conseguirse el equilibrio del conjunto de la estructura, se consideró que el nudo rígido representa la máxima fricción en el nudo de entramado.

Se establece de esta forma la cualidad del problema que se plantea en esta investigación donde se identificó el valor de los aspectos relevantes para determinar la metodología que se puede, por lo tanto, extrapolar a cualquier otra familia.

Una vez realizado el estudio de los aspectos que definen los criterios de configuración de una geometría compleja para la definición con un

entramado de bambú se puede concluir que la selección del género y especie de bambú para el trabajo con tiras puede comenzarse a partir de la selección del tipo de rizoma (Paquimorfo o Leptomorfo) el cual otorga mayor o menor facilidad de corte en fibras. A continuación la información sobre el módulo de elasticidad, la distancia entre nudos de la caña y la longitud de fibras de la planta son factores que influyen en la respuesta mecánica de la tira de bambú y del entramado y a su vez influyen en la curvatura admisible de la fibra obtenida. La combinación de un mayor módulo de elasticidad, de entre nudos mas juntos en la planta y de poca longitud de fibras en la anatomía de la planta puede disminuir la flexibilidad de los cortes obtenidos, por lo tanto, disminuir la curvatura admisible.

Por otro lado, se concluye que para constituir geometrías de doble curvatura sinclásticas los cortes de caña de 1/4 de caña, 1/8 de caña (cortes con menos momento de inercia I_x) facilitan el trabajo del tejido porque admiten mayor curvatura y son fibras con una mayor flexibilidad. A su vez, la disposición de la cara externa del bambú hacia fuera de la curvatura dio como respuesta un radio de curvatura menor que al colocarlo al revés, como consecuencia de su configuración anatómica. La construcción de superficies anticásticas, en especial las regladas, son factibles de ser configuradas con todos los cortes siendo el patrón de entramado el aspecto que influirá en la condición del corte.

Se puede decir, según muestran los resultados del análisis de comportamiento estructural, que el ángulo en que se dispone el tejido en relación al borde de la superficie influye en los esfuerzos que presentan las fibras y en la rigidez del conjunto.

Se concluye que existe una relación entre la distancia que presenta el patrón de entramado entre los puntos de cruce de fibras (nudos de entramado) y la curvatura admisible de la fibra de bambú (que depende de la anatomía del bambú y del corte), ya que se produce una curvatura para el paso de la trama sobre la urdimbre del entramado. Se complejiza si la distancia entre nudos se reduce y la superposición de fibras en el nudo es mayor que dos, con lo cual estos factores determinan el grado de curvatura necesaria y en consecuencia el tipo de corte que lo admita, así como la selección del género y especie por su anatomía.

Por último, frente al supuesto de necesitar aumentar la cantidad de volumen de material de una geometría tejida con patrón hexagonal, entre la posibilidad de realizar una disminución de escala en el patrón

geométrico del tejido (aumentando el número de fibras y el número de nudos de entramado) o la posibilidad de realizar una superposición de patrones de entramado, los resultados indican que la reducción de escala del entramado disminuye las deformaciones y los esfuerzos de las fibras, a pesar de que al superponer dos patrones geométricos de entramado aumenten las capas de fibras en un mismo nudo de entramado.

Finalmente, se considera que la conformabilidad de los entramados espaciales con fibras de bambú y la complejidad de sus superficies geométricas son susceptibles de utilizarse en diferentes ámbitos de la construcción. Las características que engloban este tipo de construcciones se desglosan y se analizan en esta investigación identificando los aspectos que, aunque pertenecen a mundos muy diferentes, confluyen en un solo objeto arquitectónico.

ABSTRACT

The construction of contemporary architectures has been characterised since the beginning of the 21st century by the use of designs defined by rigid surfaces of complex geometries and free forms. This Doctoral Thesis is proposed as a Hypothesis to demonstrate that such surfaces are susceptible of being resolved by means of fabrics constituted with natural bamboo fibers, obtaining a constructive solution with a high level of resistance, great capacity for formal definition, whose configuration as light structural sheets can be resolved by means of self-supporting constructive elements, produced with fibers of characteristic cut, geometric patterns of fabric and conditions of the interlacing knot. And whose assembly capacity allows the conformation of continuous structural forms by means of geometric tessellation

The use of natural plant materials such as bamboo fibers, which we define in this study as the minimum part of bamboo obtained from the cutting of the cane to form an interlace, in construction provide great versatility of use. The mechanical characteristics of the continuous lattice surfaces and the rigid complex geometries obtained from the fibers will depend on the particularities of the bamboo species, the cut used and the pattern of interlacing. In order to confirm the hypothesis, the objective was established to morphogenetically identify the relationship between bamboo species,

types of bamboo cutting linked to flat lattice patterns, definition of lattice knots and their capacity to configure themselves as characteristic continuous surfaces of free form geometries.

This thesis proposes the analytical study of one of the oldest bamboo joining techniques such as lattices. Fabrics that by friction form rigid and light structures. They are surfaces assembled from fibers obtained from the bamboo cuts with which different results are obtained depending on the species and the selection of the cuts. The study of fabrics with bamboo fibers, their geometric patterns of interlacing and the geometries admissible for the constitution of woven surfaces is approached. The analytical study of the interlacing and of the geometry that gives rise to the fabric allow us to know the possibility of making surfaces with double curvature. On the other hand, the cuts of bamboo are directly related to the degree of flexibility of the fibres and the mechanical resistance to make the interlacing. This analytical study interprets the relationship between the geometry of a surface, the geometric pattern of interlacing and the biomechanical characteristics of the cut of bamboo fibers in order to establish the stabilisation criteria of surfaces with double curvature in function of the distance of interlacing knots of fibres, the density of fibers in the weave and the types of cut of the material defined by its minimum admissible radius of curvature.

The working methodology of this research was key to reaching the objective of this analytical study. The methodology used is based on a trihedron defined by three aspects such as geometry, structure and shape, which condition the ability to originate surfaces. Points of analysis linked to the cuts in bamboo fibers, to its anatomy, to the disposition of the fibers to configure a weave, and to the knots in the framework. The aim was to relate and contrast the most significant information and data obtained from each of the parts that interfere in the constitution of spatial frameworks with bamboo fibers studied in the different chapters. The correspondences between two to two data were studied until obtaining interrelations of up to four data to reach the proposed objective. Finally, a case study was made analyzing the mechanical behavior by means of the Simscales program that discretizes the volume by the OpenFoam algorithm, which when working with unions or intersections of lines considers the rigid knots and fuses the material in a single surface. Assuming a structure of woven fibers in equilibrium with compressed knots that reach the rigidity in those points of the frame when the equilibrium of the whole structure is achieved, it was considered that

the rigid knot represents the maximum friction in the frame knot. In this way, the quality of the problem posed in this research is established, where the value of the relevant aspects was identified in order to determine the methodology that can therefore be extrapolated to any other family. Once the study of the aspects that define the criteria of configuration of a complex geometry for the definition with a bamboo lattice can be concluded that the selection of the genus and species of bamboo for the work with strips can be started from the selection of the type of rhizome (Paquimorphic or Leptomorphic) which grants more or less facility of cut in fibers. Then the information about the modulus of elasticity, the distance between knots of the cane and the length of fibers of the plant are factors that influence the mechanical response of the bamboo strip and the latticework and in turn influence the admissible curvature of the obtained fiber. The combination of a higher modulus of elasticity, of knots closer together in the plant, and of a short length of fibers in the anatomy of the plant can decrease the flexibility of the cuts obtained, thus decreasing the admissible curvature.

On the other hand, it is concluded that to constitute geometries of double synclastic curvature the cuts of 1/4 of cane, 1/8 of cane (cuts with less moment of inertia I_x) facilitate the work of the weave because they admit greater curvature and are fibers with a greater flexibility. At the same time, the arrangement of the external face of the bamboo towards the outside of the curvature gave as an answer a smaller radius of curvature than when placing it upside down, as a consequence of its anatomical configuration. The construction of anticlastic surfaces, especially the ruled ones, are feasible to be configured with all the cuts being the pattern of framework the aspect that will influence the condition of the cut. It can be said, as shown by the results of the structural behaviour analysis, that the angle at which the weave is placed in relation to the edge of the surface influences the stresses presented by the fibres and the rigidity of the whole.

It is concluded that there is a relationship between the distance of the weft pattern between the crossing points of the fibers (weft knots) and the permissible curvature of the bamboo fiber (which depends on the anatomy of the bamboo and the cut), as there is a curvature for the passage of the weft over the warp of the weft. It becomes more complex if the distance between knots is reduced and the overlap of fibers in the knot is greater than two, so these factors determine the degree of curvature required and consequently the type of cut that admits it, as well as the selection of the genus and species by its anatomy.

Finally, compared to the assumption of needing to increase the volume of material of a woven geometry with a hexagonal pattern, between the possibility of scaling down the geometric pattern of the weave (increasing the number of fibers and the number of weaving knots) or the possibility of overlapping weaving patterns, the results indicate that scaling down the weave reduces the deformations and stresses of the fibers, despite the fact that overlapping two geometric weaving patterns increases the layers of fibres in the same weaving knot.

Finally, it is considered that the conformability of the spatial frameworks with bamboo fibers and the complexity of their geometric surfaces can be used in different areas of construction. The characteristics that encompass this type of construction are broken down and analysed in this research, identifying the aspects that, although they belong to very different worlds, converge in a single architectural object.

*Fig. 1 Wen - Chih Wang, 2019. Construcción con entramado de bambú Love in Shodoshima, Japón.
<https://matcha-jp.com/en/7361> (20190905)*

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE LA TESIS

Esta tesis busca estudiar las características de cada una de las partes que componen una superficie espacial monocapa tejida con fibras de bambú y la relación dependiente que existe entre los diferentes factores como son la geometría de la superficie, la estructura entramada, el nudo de entramado, el material y sus tipos, y los cortes del bambú en fibras (fig. 1). En esta tesis doctoral se considera fibra a la parte mínima del bambú obtenida a partir del corte para la configuración de entramados (fig. 2). Las hebras o fibras varían en dimensión y sección según el corte que se haya realizado.

El interés sobre este tema surge al buscar la capacidad de aplicación de un material natural, como es el bambú, en geometrías complejas por medio de la técnica mas tradicional de unión como es el entramado. Además, en lo personal, fue de gran importancia la búsqueda en la comprensión de la estructura y el comportamiento del bambú desde el punto de vista biomecánico para poder dar los siguientes pasos de la investigación, utilizando criterios científicos de selección del material para su uso a distintas escalas.

El origen del planteamiento metodológico para poder desarrollar la tesis fueron una serie de preguntas planteadas buscando dar respuesta al objetivo: ¿Qué geometrías son susceptibles de ser realizadas con entramados y con un material determinado? ¿Qué características particulares necesitan para poder construirse? ¿Cuáles son los valores que las identifican? ¿Cómo se puede controlar esa geometría?.

Estas preguntas establecen la cualidad del problema que se plantea en esta investigación que identificaron el valor de los aspectos relevantes para establecer la metodología que se puede, por lo tanto, extrapolar a cualquier otra familia.

A partir de ello la metodología empleada se basa en un triedro (fig. 3, 4 y 5) que se define por tres aspectos como son la geometría, la estructura y la forma, que condicionan la capacidad de originar superficies.

La geometría como directriz de la forma cuyas líneas de fuerza y generatrices la caracterizan y la definen. La estructura (y nudo definido como el punto de rozamiento y rigidez de la estructura)

Fig. 2. Wen - Chih Wang, 2014. Construcción con entramado de bambú Magic Castle. Detalle de fibras de entramado www.caveurban.com (20190802)

Fig. 3 y 4 Esquema de la metodología empleado en esta investigación. Luego se fue complejizando a lo largo de la Tesis.
 Elaboración propia

Fig. 5 Esquema de las variables que se estudian en la Tesis. basado en la metodología.
 Elaboración propia

como la capacidad para mantener la forma, como condición de estabilidad para controlar la geometría. La forma definida como la capacidad de ser construido, en definitiva, la capacidad de ser. La forma como el resultado material y la posibilidad de ser construida. Estos tres aspectos de análisis y los subaspectos que conlleva cada uno, permitieron comprender que constituyen un método de análisis que determina un resultado concreto. Una siguiente etapa en el desarrollo de la metodología dio como resultado un triedro más específico (fig. 4), basado en el primero, que permitió adentrarse de manera más concreta en dicha investigación. La geometría pasó a incluir los entramados en el análisis, particularizando el estudio de los nudos de entramado, siendo estos aspectos dependientes entre sí. La estructura se definió por el corte en fibras del bambú, por su capacidad de mantener la forma. La forma, definida por el propio material que en este caso de estudio es el bambú, siendo el resultado material.

La metodología, por lo tanto, fue el medio por el cual se estudiaron una selección de casos de cestería, elementos constructivos y arquitectura, y por otro lado el estudio del comportamiento estructural comparativo (11 casos), el cual se realizó variando los aspectos de estudio del triedro, pero manteniendo las condiciones externas para poder ser comparados (la carga continua, las dimensiones de la geometría, las condiciones en los bordes y en los apoyos de la geometría). Desde el caso de estudio 1 al 7 se variaron las condiciones de entramado, el caso 8 y 9 se varió la geometría espacial manteniendo el entramado, los cortes y el bambú empleado. En el caso 10 se cambió la especie de bambú para poder comparar la constructividad en base a la selección del material natural que con lleva una selección concreta del material constructivo. El último caso, el 11, se realizó cambiando el corte del bambú.

Es posible desarrollar tejidos con fibras para configurar desde objetos hasta espacios arquitectónicos realizando un cambio de escala desde el material que lo configura (la especie y el corte) (fig.6) hasta la propia geometría que se genera.

La posibilidad de trabajar a diferentes escalas está presente en todos los patrones de entramado y requiere comprender y disponer de los cortes del bambú adecuados para responder mecánicamente a las solicitudes de la estructura. Para comprender mejor el problema de la escala fue necesario conocer el trabajo con fibras de bambú que se realiza en cestería, en arquitectura y en las obras de ingeniería civil realizadas tradicionalmente en Asia (fig. 7 y 8).

Fig. 6 *Dendrocalamus sinicus*, 30 metros de altura y 30 cm de diámetro. China. Ejemplo de bambú.

YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). *China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)*, (33).

Fig. 7..Puente Quan Xian (300 a.C.) en China, construido con cuerdas de bambú de Sinocalamus affinis.

Needham, J., & Ronan, C. A. (1995). The shorter science and civilisation in China (Vol. 5). Cambridge University Press.

Fig. 8..Puente Quan Xian (300 a.C.) en China, construido con cuerdas de bambú de Sinocalamus affinis.

Needham, J., Wang, L., & Lu, G.-D. (1971). Science and civilization in China⁴ Part 3. Cambridge: University of Cambridge Press.

La geometría de una superficie, el material, la técnica y la posibilidad de construirse constituyen partes de un todo, fuertemente vinculados e históricamente relacionados. La evolución del estudio de los materiales naturales, de las técnicas constructivas y la comprensión del funcionamiento estructural - mecánico están dando pie a la introducción de nuevas geometrías, superficies espaciales más libres, que ponen a prueba el conjunto.

La forma y el material

Los patrones de entramados con fibras naturales, a modo estructuras, son históricamente conocidos y como técnica están intrínsecamente ligados a la condición del material (tanto anatómicamente como físicamente, fig. 9), a la dimensión del material, a los cruces propios del entramado y a la densidad de las fibras en el tejido, y finalmente a la geometría que se busca realizar.

Desde la naturaleza se expresa esta simbiosis ya que las formas naturales son consecuencia de las leyes físico mecánicas que la componen. Involucran las formas, la sistematización, la materialización y todo confluye en un elemento en equilibrio que responde continuamente a los cambios intrínsecos y del entorno. La gravedad somete también a la forma resultante, que dará respuesta a sus leyes físicas, al igual que la materialidad (Araujo, 2004).

La forma es un concepto que se definió desde muchos puntos de vista. La búsqueda del S XXI es la de las formas continuas que pierden los límites, dando nuevo carácter a los espacios siendo más fluidos. Para ello la evolución de los sistemas constructivos y el estudio de los materiales se hace imprescindible.

La forma estructural es el resultado de la disposición del material vinculado a la resistencia mecánica del conjunto y de las partes que lo componen. Esto implica también la unión entre los materiales, es por esto que la forma y el material son aspectos vinculados y la posibilidad de ejecutarse hace referencia a la posibilidad de ser construido.

La constructividad

La “constructividad”¹ se podría definir como las características físico

Fig. 9..Sección longitudinal de una caña de bambú con la identificación de las partes mas importantes: nudo, pared, diafragma, entrenudo.

YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), (33).

¹ El concepto oficial de constructividad, mas utilizado en inglés: constructability, identifica los posibles errores antes de que el proyecto sea construido. Este término define la facilidad con la que puede realizarse o ser construido un proyecto.

*Fig. 10 Wen - Chih Wang, 2014. construcción con entramado de bambú Magic Castle, Japón
www.caveurban.com (20190802)*

mecánicas de un elemento. La información relacionada con la resistencia mecánica de una forma estructural, que plantea el comportamiento resultante de la conjunción de la geometría, la estructura, las uniones y el material de un objeto arquitectónico.

Esta investigación estudia la posibilidad de construir estructuras espaciales monocapa donde el tejido en sí mismo, por rozamiento de las fibras y/o por densidad de estas, o por la forma geométrica del conjunto (superficie compleja de doble curvatura o de simple curvatura) se une y conforma un sistema en equilibrio (fig. 10).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Visto que las características de este material lo hacen propicio para la construcción y conociendo sus valores, en esta investigación se plantea el estudio analítico de la conformación de entramados espaciales a partir de fibras de bambú y su geometría. Se abordará desde la escala biomecánica del material, como parte mínima. Obteniendo, por la suma de las fibras y el patrón geométrico, superficies espaciales y geometrías continuas.

1.3. HIPÓTESIS

La construcción de las arquitecturas contemporáneas se está caracterizando desde el comienzo de siglo XXI por la utilización de diseños definidos mediante superficies rígidas de geometrías complejas y formas libres. Esta Tesis Doctoral se plantea como Hipótesis el demostrar que tales superficies son susceptibles de resolverse mediante tejidos constituidos con fibras naturales de bambú, obteniendo una solución constructiva con elevado nivel de resistencia, gran capacidad definición formal, cuya configuración como láminas estructurales ligeras se puedan resolver mediante elementos constructivos auto portantes, producidos con fibras de corte característico, patrones geométricos de tejido y condiciones del nudo de entrelazado. Y cuya capacidad de ensamblado permita la conformación de formas estructurales continuas mediante teselación geométrica.

La utilización de materiales vegetales naturales como las fibras de bambú en la construcción otorgan gran versatilidad de uso. Las

Fig. 11 Wen - Chih Wang, 2014. construcción con entramado de bambú Magic Castle, Japón, www.caveurban.com (20190802)

características mecánicas de las superficies entramadas continuas y geometrías complejas rígidas obtenidas a partir de las fibras dependerán de las particularidades de la especie de bambú, el corte empleado y la edad de la caña de bambú utilizada.

1.4. OBJETIVO

Identificar morfogénicamente la relación entre especies de bambú, tipos de corte de bambú vinculados a patrones de entramado planos, definición de nudos de entramado y su capacidad de configurarse como superficies características continuas de geometrías de formas libres.

La línea de investigación de esta tesis parte de una serie de pautas vinculadas a la morfología del material y al proceso previo necesario para la obtención de un tejido. La confluencia de distintos factores afecta y genera un resultado con condiciones particulares.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS Y METODOLOGÍA

La metodología

La metodología de análisis en este trabajo de investigación marcó las pautas de estudio para el análisis teórico y para el estudio de casos también. Se identificaron desde un principio tres partes fundamentales de un todo que constituye un tejido con fibras de bambú (fig.11). Esta metodología llevó a estudiar la conformación de cuerdas de bambú, de gaviones, hasta de arquitecturas de geometrías complejas. Determinando la especie de bambú con la que se lleva a cabo el tejido se pueden conocer sus características biomecánicas como son: su radio de curvatura admisible, su módulo de elasticidad, su gravedad específica, etc. La especie de bambú (fig. 12), proporciona información sobre la mayor o menor disposición para realizar los cortes en fibra y la selección de su anatomía a partir del corte de la caña. Los patrones de tejido y su densidad condicionan la geometría final buscada y a la vez la selección del corte y del material natural. Por todo ello, esta metodología pudo adaptarse y volverse más compleja a lo largo de la investigación, pero manteniéndose presente hasta en el estudio de casos.

Fig. 12..Bambú género *Guadua*
www.bambucasascarolina-zuarq.blogspot.com.es/p/la-guadua.html (20190905)

Fig. 13 Syoryu Honda, Spring 2001,
Bambú *Phyllostachys bambusoides* (Madake), entramado Twining, trama torsio-
nada y urdimbre simple.
www.craftcouncil.org/magazine/article/why-innovation-matters, cortesía de Mu-
seum of Art and Design (20180508)

Fig. 14 Morigami Jin, 2004
Bambú *Phyllostachys bambusoides* (Madake), Entramado hexagonal Kagome
Ami.
www.mintmuseum.org/art/collections/item/reclining-i (20141002)

Los capítulos

La tesis se ordena en cinco capítulos que fueron el recorrido de estudio de la investigación. Se buscó relacionar y contrastar la información y los datos obtenidos mas significativos de cada uno de las partes que interfieren en la constitución de entramados espaciales con fibras de bambú estudiados en los diferentes capítulos. Se estudiaron las correspondencias entre datos dos a dos hasta obtener interrelaciones de hasta cuatro datos para llegar al objetivo planteado.

El estudio se realizó en diferentes etapas de trabajo:

Etapas I: Estudio del material vegetal: Condiciones intrínsecas del bambú

Aspectos anatómicos – biológicos del bambú, en principio ajeno a la disciplina académica de la arquitectura, pero, imprescindible para identificar sus características propias que tienen consecuencia directa en el resultado mecánico y estructural vinculado a la resistencia de materiales.

- Características morfológicas, su geometría, composición química, micro estructurales, de crecimiento, tipologías, estudios de resistencia, diferenciación de las áreas de la caña según características mecánicas.
- Objetivo: conocer el material y la información técnica más actual.

Etapas II: Estudio de los cortes para la obtención de fibras de bambú.

- Tipos de cortes y resultados mecánicos, procesos para la realización de cortes y obtención de fibras, estados del bambú e influencia en la fibra, tejidos y patrones.
- Objetivo: relación entre la anatomía del bambú, el corte y la relación con la resistencia mecánica. Antecedentes y métodos actuales del trabajo y obtención de fibras de bambú.

Etapas III y IV: Patrones de entramado y superficies espaciales.

- Tipos de tejidos y patrones geométricos (fig. 13 y 14), superficies geométricas espaciales, elementos que la generan, dimensiones, nudo de entramado, rozamientos.
- Características y tipos de superficies geométricas, líneas de fuerza y generatrices, singularidades.
- Objetivo: Establecer las superficies que generan los entramados de fibras y entender su configuración como tejido rígido. Conocer las alteraciones geométricas del patrón de tejido para la configuración de

*Fig.15.. Wen - Chih Wang, 2016 Dream of Olive, Shodoshima, Japón,
www.setouchiexplorer.com (20190615)*

superficies con curvatura.

Etapas V: Relación entre las variables estudiadas en las etapas anteriores. Estudio de casos mediante el análisis por elementos finitos.

- Análisis y estudio de las características más determinantes de las etapas anteriores, referencias en la historia de la arquitectura y actuales sobre la construcción de superficies espaciales con fibras entrelazadas de bambú (fig. 15).
- Utilización de la metodología planteada para establecer relaciones entre variables y así obtener datos concretos enfocados al cumplimiento del objetivo de la tesis.
- Estudio comparativo de casos de geometrías de doble curvatura con entramados variables y comprobando el comportamiento estructural cambiando la especie de bambú también.
- Análisis de los modos de comportamiento del trabajo estructural de las configuraciones geométricas espaciales, configuración de nudo de entramado, configuración del patrón de entramado y configuración del corte en fibras del material natural (11 casos de análisis). Se utilizó para ello el software de acceso abierto Simscales² y la aplicación posterior de Paraview³ para la maquetación de los resultados del análisis. Se trabajó con la geometría de doble curvatura hyper paraboloid hiperbólico, superficie compleja, que admite tanto el equilibrio de fibras a compresión y a tracción como la generación a modo de geometría reglada. Esto nos permitió establecer un criterio metodológico de modos de comportamiento estructural de geometrías complejas.
- Resultados y conclusiones
- Objetivo: Obtener relaciones concretas y datos entre parámetros para la construcción de superficies espaciales tejidas con fibras de bambú

Marco histórico

² Simscales es un programa de ingeniería asistido por ordenador, de código abierto, que permite el análisis estático de estructuras sobre una matriz de puntos tensionales discretiza unidades mínimas para establecer la deformación de acuerdo a esas tensiones.

³ Paraview se define en su página web como: una aplicación de visualización y análisis de datos multiplataforma de código abierto. Los usuarios de ParaView pueden crear rápidamente visualizaciones para analizar sus datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. La exploración de datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o programática utilizando las capacidades de procesamiento por lotes de ParaView.

Fig. 16. Wen - Chih Wang, 2013. Imágen desde el interior de la construcción llamada Light of Shodoshima tejida con bambú, Japón www.art-takamatsu.com (20151002)

Se estudiaron los aspectos que determinan la construcción de superficies geométricas entrelazadas con fibras de bambú (fig. 16) y los procesos que los conforman. Una revisión histórica que permite comprender su vinculación a aspectos socioculturales y técnicos, y entender la evolución de los diferentes ámbitos de estudio implicado (fig 17, 18 y 19).

Marco gráfico

Esta investigación tiene un gran desarrollo gráfico, que forma parte de la metodología analítica también, que permitió un estudio detallado de patrones geométricos de entrelazado⁴, tipologías, repeticiones, sistematizaciones que hubiera sido imposible sólo mediante la escritura. Desde el planteamiento de la tesis se identificó la representación mediante el dibujo como una herramienta mas de análisis e imprescindible para la obtención de datos.

Marco técnico y experimental

Para esta tesis se recurrió a artículos científicos experimentales y libros vinculados al tema de análisis que dieron lugar a comparativas y a la obtención de información concreta.

El contacto con investigadores y profesores relacionados con el tema de esta investigación fue de gran importancia para obtener respuestas más específicas.

El desarrollo de un proyecto experimental de construcción (2014) con el organismo de investigaciones arqueológicas Kerala Council of Historical Research en India⁵, dio la oportunidad de conocer, estudiar y experimentar las condiciones de algunas especies locales de bambú para su uso en construcción.

Además, de forma particular, con el objetivo de llegar a obtener la

4 Se estudiaron analítica y gráficamente 17 entramados (ver capítulo IV de este documento). Los casos de estudio realizados están basados en la selección de patrones realizada por Oscar Hidalgo (2003) quien priorizó los patrones geométricos mayormente presentes en diversas culturas.

5 Se realizó el proyecto para la cubierta de las excavaciones arqueológicas de Muziris en Kerala, India. Proyecto arquitectónico dirigido por Luis Feduchi para Kerala Council of Historical Research. Como arquitecta en el sitio realicé una estancia y llevé a cabo el proyecto básico hasta su aprobación y posteriormente la ejecución de dicha cubierta como parte del workshop realizado junto con los alumnos de la Universidad CEPT de Ahmedabad para la Biennale de Kochi Muziris 2014.

6 En el proyecto se utilizó el bambú *Dendrocálamus strictus*.

Fig. 17 Imágenes Egipcias con cuerdas

Fronzaglia, B., & Ropes, N. E. (2006, March). *The History of Rope*. In *The Classic Yacht Symposium*. Herrreshof Marine Museum (Vol. 31).

Fig. 18..Reconstrucciones funerarias de bambú en Ecuador.

Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Hidalgo.

Fig. 19..Vestigios de construcciones con bambú en Ecuador

Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Hidalgo.

*Fig. 20..Corte de 1/4 de bambú, manteniendo las dos caras Cortes de bambú Phyllostachys bambusoides
Pruebas experimentales de radio mínimo de curvatura según cortes , 2016
Elaboración propia*

*Fig. 21..Corte de 1/8 sólo la cara interior.
Pruebas experimentales de radio mínimo de curvatura según cortes , 2016
Elaboración propia*

información necesaria para el desarrollo de este escrito, se realizó (2016) una experimentación de laboratorio⁷ en el cual se pudo analizar el comportamiento a flexión de los cortes de una caña de bambú con características concretas (fig. 20 y 21). El resultado de esta experimentación fue expuesto mediante un artículo enviado y publicado en la revista indexada *Anales de la Edificación* (UPM) (marzo de 2019) titulado: "Estudio de los radios de curvatura mínimos de los cortes de bambú. Análisis experimental con *Phyllostachys bambusoides* Sieb. et Zucc."⁸.

1.6. ESTADO DEL ARTE

El uso de las fibras vegetales

El trabajo manual con fibras vegetales para la creación de diferentes elementos se origina en el inicio de los tiempos.

Las primeras representaciones Egipcias (4.000 - 3.500 a.C.) muestran (figura 17) la utilización de cuerdas de fibra entrelazadas y su producción (Fronzaglia, 2006). Posteriormente en el año 2.800 a.C., aproximadamente, se pueden datar las primeras cuerdas tejidas de cáñamo Chinas.

En el mundo marítimo - náutico, se puede observar la evolución en referencia al uso de las fibras vegetales para la cordelería (Needham, Wang, & Lu, 1971) hasta la aparición materiales sintéticos como el nylon y el poliéster en 1950 (Fronzaglia & Ropes, 2006). Cecil Torr, arqueólogo y escritor británico, registró el uso de cuerdas en barcos ancestrales de los Romanos y Atenienses en el 330a.C. (Company Upson Walton, 1902).

La tradición vernácula permitió el desarrollo de nuevos usos y avances de las fibras vegetales de cada cultura mediante las posibilidades que brindan las variables como el corte, el tipo de curado y secado de las fibras y los entramados que admiten las fibras según su flexibilidad (fig. 22 y 23). Los avances en mecanizado y producción en serie dieron pie a la fabricación industrial de elementos con fibras naturales comercializables.

Los primeros estudios sobre las plantas y sus usos, en particular sobre

⁷ Ver Cap. III, 3.4.3. Experimentación: Radio mínimo de curvatura según el corte, página 123.

⁸ Incluido en el anexo de este documento.

*Fig. 22 Detalles constructivos de viviendas con fibras naturales en Suazilandia
www.swazilandarchitecture (20190905)Swaziland-Cultural-village-*

*Fig.23 Detalles constructivos de viviendas con fibras naturales en Uganda
Uganda-flickr-Andrew-Moore (20170226)*

el bambú, se reflejan en el libro de la dinastía China Kaizi Dai que se escribió entre los años 265-316 d.C.: “Enciclopedia de bambú”, que es valorado como el primer libro sobre el estudio del bambú (Xiaobing Yu, 2007) (fig. 24).

Entre los siglos XV y XVI la navegación permitió las expediciones botánicas, la constitución de jardines para estudio y la invención de la imprenta que dieron pie al desarrollo de la Botánica pura como disciplina científica, separándose de la herboristería y de la medicina lo que permitió el avance de las investigaciones y estudios concretos de especies. Esto permitió la internacionalización de estos conocimientos, el estudio comparativo y la clasificación de gran número de géneros y especies. Además, el desarrollo de la imprenta y de la representación de los dibujos mediante grabados permitió la difusión descriptiva de los estudios de botánica⁹ (Peláez & Álvarez, 1992).

Las primeras normativas para estandarizar u ordenar los estudios mecánicos que se comenzaron a realizar a las cañas de bambú datan de 1973 realizado por la Oficina India Bureau of Indian Standards. Teniendo como objetivo la metodología en la realización de test de laboratorio a los bambúes (IS:6874) (Trujillo, 2018).

Otro de los aspectos a destacar del uso de las fibras vegetales vinculado a las culturas, mucho mas reciente, tiene que ver con la normalización y las asociaciones para su continuo análisis, investigación y estudio. Como es el caso del Comité Nacional de la *Guadua* en Colombia formado en 1983 con el fin de incluir esta especie de bambú en el Plan de Acción Forestal y la difusión y fomento de la *Guadua* para múltiples propósitos. A finales del s. XX Dr. Jules Janssen desarrolló una serie de ensayos estandarizados para la experimentación con bambú. Este avance en la metodología de trabajo experimental la desarrollo en la Universidad Eindhoven de Tecnología y con el apoyo de uno de los organismos mas importantes en la actualidad, el INBAR, International Network for Bamboo and Rattan que se originó en 1997 y está presente en la actualidad con oficinas en 41 países (Trujillo, 2018). Esta organización intergubernamental desarrolla proyectos de investigación, capacitación y normativa para el uso de bambú y ratán de forma internacional. A partir del avance realizado por Janssen e INBAR en referencia al estudio de casos, se fueron creando diferentes códigos en relación al estudio de la resistencia mecánica y las propiedades del bambú, como son: ISO 22157-1 e ISO 22157-2 (Trujillo, 2018)

Fig. 24 El libro *Bamboo Chart* fue escrito en la Dinastía Jing China por Dai, Kaizhi [2007]. Asian Art Museum. Yang, Y., Hui, C., & others. (2010). *China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)*, (33)

9 Rumphius 1750 detalla de forma botánica el bambú en el libro “Herbarium Ambionese”.

Fig. 25.. Wen - Chih Wang. Imágen desde el interior de la construcción llamada Light of Shidosima tejida con bambú, Japón, 2013, www.art-takamatsu.com (20151002)

En 2013 INBAR propuso reactivar las ISO 22156 e ISO 22157 mediante la formación del grupo intercultural WG12 para actualizar las normativas y dar forma a nuevas consideraciones de estandarización y test del material. (Trujillo, 2018). Actualmente se fueron registrando patentes, que constituyen un indicador sobre los avances técnicos que se realizan en torno al material y los sistemas constructivos que se desarrollan (Domouso, 2015).

El bambú

El bambú crece de forma natural desde el paralelo 29°N hasta los 47° Latitud Sur aproximadamente (Londoño, 2002). Por su ligereza, su maleabilidad y resistencia esta hierba fue utilizada de diferentes maneras tanto en arquitectura (fig. 25) como en ingeniería a lo largo de la historia

La superficie mundial de los bosques de bambú es de aproximadamente 1,500 x 10⁴ ha, de las cuales la zona del Sureste de Asia cuenta con 1,000 x 10⁴ ha. (Yuming, & ChaoMao, 2010).

Desde el punto de vista taxonómico los bambúes son de la familia Poaceae y de la subfamilia Bambusoideae, que a su vez se divide en la tribu de los bambúes herbáceos u Olyrodae, y la tribu de los bambúes leñosos o Bambusodae.

“La tribu Olyrodae en América reúne un total de 20 géneros y aproximadamente 130 especies de bambúes herbáceos, lo que equivale al 80% de la diversidad genérica mundial. La tribu Bambusodae en América reúne los bambúes leñosos y tienen como centro de diversidad la cordillera de los Andes, albergando el 87% de las especies (Clark, 2001)”(Londoño, 2002).

Otra diferenciación entre bambúes se da por el tipo de rizoma, de los cuales se pueden distinguir tres tipos: paquimorfo, leptomorfo y amfimorfo. Siendo los principales los dos primeros. Esta distinción permite identificar los bambúes ya que presentan diferencias en sus características que van desde las distancias y tipos de entrenudos que son las separaciones que tiene la caña a lo largo de su eje principal, la forma de proliferación, hasta la identificación de diferencias fundamentales en cuanto a su anatomía como es la gravedad específica (densidad de materia por unidad de volumen) que tiene relación directa con la fuerza de la caña (Londoño, 2002).

*Fig. 26. Arquitecta Anna Heringer. Imágen de las construcciones Three Houses para la Bienal de bambú, China, 2016.
Autor de la fotografía: Julien Lanoo
www.arquitecturaviva.com (20190905)*

En cuanto a los avances en el estudio en el campo de la biología con respecto al bambú, los libros y publicaciones de Walter Liese (Berlín, 1926) fueron imprescindibles para el desarrollo del conocimiento sobre la anatomía del bambú.

Para muchas culturas primitivas de Asia y Sudamérica el bambú fue un elemento esencial en su vida. Algunas sociedades creían que esta planta representaba una divinidad y era digna de adoración. En Piyuma Tribe en Formosa, Taiwan, se creía que el origen del hombre y de la mujer estaba dentro de la caña de bambú (Hidalgo, 2003).

El uso del bambú en Asia se puede encontrar desde el principio de los tiempos, vinculado a distintos usos tan complejos como la construcción de edificaciones o de ingenierías. “Los *homo erectus* descubrieron la facilidad de cortar las cañas de bambú con un ángulo de 45° y 2 cm abajo o arriba del nudo donde las fibras de la caña son mas cortas” (Stamm, 2008).

“Siendo el bambú una vara hueca era más fácil de cortar con un bifaz o un hacha de piedra (golpeando justo encima de un anillo), que los troncos macizos de árboles de madera de un similar diámetro, también era más fácil de transportar. Así que antes la edad de piedra deberíamos llamarla “edad del bambú”. Mientras el Neolítico definitivamente está llegando a su fin hasta en las zonas más remotas de Nueva Guinea ha llegado el “machete”, la “edad de Bambú” es muy esencial en la economía informal en muchas zonas rurales de Asia, África y América. A esto se agrega que en muchos países tropicales, tanto en zonas rurales como en invasiones urbanas, la vivienda es todavía construida en buena parte con bambú” (Stamm, 2008).

En China, por ejemplo, la presencia del bambú se registra también en su literatura, Xiaobing Yu, (2007) cita: “Amplios usos del bambú se han registrado en la literatura histórica. En el Jing (265-316 d.C.) la dinastía Kaizi Dai escribió el libro “Enciclopedia de bambú”, que es considerado el primer libro sobre investigación del bambú en el mundo.”

Está presente a lo largo de la historia de la cultura China desde su uso medicinal hasta en arquitectura o la música. Vinculado también a la industria y su evolución, hasta la actualidad (fig. 26).

El bambú se destaca como material utilizado en Asia, especialmente en el desarrollo de infraestructuras, ingeniería marítima y construcción de China por su resistencia a tracción de los cortes en tiras en la dirección

*Fig. 27..Nakanura Tomonori, Dimension, 2017
madake bamboo, rattan
www.taimodern.com (20190806)*

*Fig. 28..Yamaguchi Ryuun, Kushime-ami Flower Basket, 1989
madake bamboo, rattan
www.taimodern.com (20190806)*

de las fibras (Needham, 1971). Grandes puentes colgantes con cuerdas de bambú e infraestructuras de ingeniería hidráulica mediante gaviones tejidos con fibras aparecen a lo largo de la historia de China.

En América Latina se encontraron también diferentes restos que demuestran la presencia prehistórica del bambú en diferentes zonas y la utilización de las cañas de bambú en distintas partes de la construcción, como estructura, cerramientos tejidos, cubiertas, etc.

En Ecuador se encontraron vestigios de construcciones con bahareque¹⁰ en viviendas de hace 3.500 años e impresiones de tejidos sobre arcilla procedente de muros en zonas donde el bambú es un género vegetal predominante (Hidalgo, 2003).

Los entramados y las superficies geométricas

Es posible decir que los tejidos constituyen, junto con los nudos, la metodología de unión entre fibras mas antigua. Los entrelazados están presentes en la historia de todas las culturas y adaptados a cada zona según sus fibras naturales y necesidades.

G. Semper ¹¹(arquitecto, 1803 – 1879) situó los tejidos como el origen de la constitución de las viviendas primitivas, partiendo de las técnicas textiles de entrelazados para las vestimentas (Muslimin, 2010).

La fricción se hace efectiva en algunas fibras naturales mas que en otras. En el caso del bambú, la realización de cuerdas con fibras de esta planta desarrolladas en China, favoreció al desarrollo de cables que requerían una alta resistencia al rozamiento para su utilización principalmente en náutica.

A otra escala, la cestería permitió el desarrollo de infinidad de técnicas con diferentes fibras naturales (fig. 27 y 28). En Asia se destaca el desarrollo de esta técnica con fibras de bambú presente hasta la actualidad con origen en la ceremonia del té (alrededor de los S. XVIII y XIX) procedente de China y posteriormente adoptada en Japón (Martin & Maiko, 2018).

Es posible englobar las metodologías en tres tipos universales: entrelazado, enrollado y torsionado. Cada una de ellas admite mas o menos curvatura y flexibilidad dependiendo de las características de

10 Superficies planas entrelazadas con fibras naturales.

11 Arquitecto Alemán significativo de mediados del siglo XXI. Compaginó diferentes estilos históricos Buscó relacionar la museística, las ciencias naturales y la técnica.

Fig. 29. Charles O. Perry. Instalación llamada Eclipse, Para el Hyatt Regency en el embarcadero de San Francisco, 1973.

Foto de Bill in DC, Flickr. Pinterest (20191130)

la fibra que lo constituye (Adovasio, 1997) y del patrón geométrico de entrelazado que se utilice.

Las publicaciones del Dr. Tarnai Tibor (Departamento de mecánica de estructuras de la Universidad de Budapest) y Alison Grace Martin (Mathematical and Art galleries) en referencia a la geometría y los entramados constituyen en la actualidad un gran referente en estos temas.

El avance en los estudios mecánicos y biológicos sobre el bambú como material de construcción, y la creciente valoración como tal, está haciendo posible la experimentación y el trabajo a gran escala con diferentes cortes de la caña de bambú. Es posible enumerar gran cantidad de construcciones y obras de ingeniería actuales realizadas con cañas de bambú y mediante tejidos de sus fibras.

Geometrías espaciales

“Los algoritmos no sólo son aplicables a la tecnología moderna, de vanguardia. Técnicas tradicionales de producción existentes (cestería, tejido, fabricación de encaje) contienen algoritmos incorporados. Cómo diseñar patrones de subdivisión de superficies y problemas de manipulación superficial es un problema compartido por diseñadores computacionales y cesteros. Construyo modelos para explorar cómo una cestería se aprecia para representar un mapa topológico de la estructura” (Martín, 2015)

La geometría está presente en todos los organismos de la naturaleza, en todos ellos hay una relación directa entre factores como la gravedad, energía, mecánica, estabilidad, líneas de fuerza, escala, proporción, regularidad, frecuencia, etc. Son las formas geométricas constituidas bajo las leyes físicas (Araujo, 2004). A lo largo de la historia el estudio de las superficies geométricas (fig. 29) constituyó una herramienta fundamental para el desarrollo en todos los ámbitos. Principalmente presente en arquitectura mediante sólidos platónicos hasta finales del siglo XX cuando toma valor en concepto de la envolvente.

Los papeles de Fuller y Le Ricolais antes y después de la Segunda Guerra Mundial fue fundamental para la reflexión y comprensión de las estructuras espaciales repetitivas. En 1951 B. Fuller desarrolló el domo geodésico, que patentó, en base a la investigación sobre la

Fig. 30 Estudio gráfico de densidades de patrones de tejidos aplicados a una esfera.
 Xing, Q., Esquivel, G., Collier, R., Tomaso, M., & Akleman, E. (2011). Weaving methods in architectural design. *Proc. Bridges: Mathematical Connections in Art, Music and Science* (pp. 216–224).

proyección de una malla hexagonal sobre una esfera. Lo que propició un gran avance en la concepción de estructuras espaciales (Schueller & Heck, 1983).

Actualmente el diseño digital (fig. 30 y 31) proporciona una nueva herramienta para generar superficies complejas y de forma libre, que acompañado por software de cálculo de estructuras es posible analizar y establecer, previos a la construcción, diseños con patrones de entrelazado que determinan el tipo de fibra y su sección necesarios para formalizar la arquitectura (Muslimin., 2010).

El desarrollo futuro

“La investigación actual de nuevos materiales con fibras hace pensar que el bambú y su uso en arquitectura se considere un material contemporáneo, la Era de la fibra”(Estévez, 2005).

El gran avance en cuanto a las investigaciones se da actualmente con las posibilidades que brindan los nuevos programas digitales de estudio. Los software permiten evaluar mecánicamente los factores biomecánicos de las fibras naturales usadas para construcción, además dan la posibilidad de comprender mejor, mediante el estudio detallado, las técnicas tradicionales y las reglas que las rigen. Además, las nuevas tecnologías, admiten la selección de modelos de estudio como metodologías capaces de repetirse y transferirse a otros modelos o materiales para obtener el comportamiento mecánico de diferentes estructuras. Es posible ampliar la visión en cuanto a las posibilidades que ofrece la botánica para la arquitectura a través del estudio con las metodologías actuales.

Fig. 31 Estudio gráfico de densidades de patrones de tejidos aplicados a una esfera.
Xing, Q., Esquivel, G., Collier, R., Tomaso, M., & Akleman, E. (2011). *Weaving methods in architectural design. Proc. Bridges: Mathematical Connections in Art, Music and Science* (pp. 216–224).

	BIOLOGÍA - BOTÁNICA	BAMBÚ - FIBRAS NATURALES	CONSTRUCCIÓN -ENTRAMADOS	HERRAMIENTAS	MOMENTOS HISTÓRICOS	ASOCIACIONES -NORMATIVAS
a.C. INICIO DE LOS TIEMPOS			Uso de cuerdas trenzadas			
			4.000 -3.500. Primeras representaciones Egipcias de cuerdas con fibra			
			2.800. Cuerdas con cáñamo en China			
			700. Referencias a las cuerdas Iliada y Odisea			
S. V						
S. III			330. Cecil Torr, M. A. Registra usos de cuerda en barcos Romanos y Atenienses.			
S. I			300. Ingeniería China con cuerdas de fibra de bambú			
d.C. S. I			S. I. Cuerdas para invenciones mecánicas			
		265 - 316 .Dinastía Kaizi Dai (China) Primera enciclopedia de bambú				
S.X		S. XIV. Marco Polo Viajes por India y China <i>Libro de las maravillas</i> uso de cuerdas trenzadas y torsionadas				
S.XV	S. XV - XVI La Botánica como disciplina científica (separada de herboristería y de medicina)		S. XV - XVI Puente Inca Qeshuachaca de cuerdas de q'oya	1452- 1519. Leonardo Da Vinci Dibuja máquinas para realización de cuerdas, con fibras		
				1.700. Patentes de máquinas para realización de cuerdas		
S.XX					1.950. Nuevos materiales sintéticos, como Nylon reemplazan las fibras naturales	1.976 . CIBAM Centro de Invest. del Bambú y Fibras Vegetales
		1994. Desborde del Río Páez(Colombia) se recurre al bambú para const. puentes				1.997. INBAR International Network for Bamboo and Rattan
		1999. Terremoto en Colombia Auge de la const. con bambú	1999. Tablones bambú laminado China 1999. Vigas de bambú laminado Colombia			1.998. SCB Sociedad Colombiana del Bambú 1.998. Normativa Norma Colombiana de const. sismo resistente G-NSR-10-Decreto final 2010-01-19
S.XXI				Máquinas de corte láser y de control numérico		2002. Normas técnicas para uso de Guadua Colombia

Fig. 32. Elaboración propia

"I'm not trying to imitate nature, I'm trying to find the principles she's using."

Buckminster Fuller

CAPÍTULO 2 EL BAMBÚ

2.1. ETNOBOTÁNICA

La etnobotánica se puede definir como el estudio de las relaciones entre las personas y las plantas. Es necesario el estudio etnobotánico para conocer las aplicaciones históricas de las especies vegetales requeridas para cubrir las necesidades básicas humanas.

Las plantas de fibra¹ forman parte de la evolución humana de todas las culturas. Como materia prima, alimento, artesanía, etc. las plantas de fibra fueron utilizándose y explorándose en diferentes civilizaciones ligadas al desarrollo de cordelería y entrelazados, construcción, entre otros usos (Macía, 2006).

La etnobotánica permite analizar la interacción natural y evolutiva entre los humanos y las plantas diferenciando las posibilidades que otorgan los entornos naturales y el desarrollo cultural de la población.

Las construcciones van unidas a las costumbres, adaptándose a las condiciones y recursos que la población y las culturas tienen a su alcance (Lucas Bo, 2015). Se precisa comprender y unir conocimientos que en definitiva son la suma de diferentes aspectos para dar forma a una técnica constructiva que sea capaz de pasar por generaciones formando parte de la cultura vernácula de un pueblo (Bosch, 2012).

2.2. ESTUDIO DE TAXONOMÍA Y ANATOMÍA DEL BAMBÚ

"Si estas estrategias de los materiales naturales se describen en términos de ingeniería, existen nuevas estrategias para el diseño, incluyendo la distribución diferenciada de células, haces y fibras en una sección de bambú para producir propiedades estructurales anisotrópicas y emergentes, la forma de adaptación en los nodos, secciones variables y diferentes componentes dimensionales (diafragmas) a lo

1 Plantas con estructuras de soporte largas y finas.

Fibre diameters and lengths. Symbols (black triangles – wood fibres; white triangle – mesocarp fibres; black circles – seed hairs; white circles – fibres of monocots; white rectangles – bast fibres) represent estimated mean values, and the dotted lines show ranges of literature data. The linear curve represents an aspect ratio of 100. Data were taken from Ageeva et al. (2005), Aldaba (1927), Angelini et al. (2000), Ashori et al. (2006), Baley (2002), Jarman and Laws (1965), Khalil et al. (2008), Kozłowski et al. (2005), Kundu (1956), Leupin (2001), McDougall et al. (1993), Morvan et al. (2003), Mukherjee and Satyanarayana (1986) and Ruys et al. (2002).

Fig. 33..Diámetros de diferentes fibras naturales y longitud
Stevens, C. (2010). *Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications* (Vol. 10). John Wiley & Sons.

largo de este” (Weinstock, 2006).

Las plantas de fibra

Las fibras vegetales, desde el punto de vista botánico, tienen como función la de rigidizar los tejidos a modo de estructura soporte. Las células de las fibras vegetales son mas gruesas que otras células ya que tienen una estructura larga y fina compuesta de dos paredes vegetales.

“La composición de la pared celular de las fibras vegetales es principalmente de celulosa y en segundo término de lignina (...) Las fibras se encuentran en varias partes de la planta, corteza, tallo o tronco, ramas, hojas, pero son más frecuentes en los tejidos vasculares” (Macía, 2006).

Los entramados, la cestería y diversos elementos tejidos de forma manual fueron y son desarrollados a partir de plantas de fibra por su resistencia a tracción en la dirección de su eje principal, además de su maleabilidad.

2.2.1. Taxonomía

Cada elemento natural requiere un modo de utilización particular para lo que es necesario conocer previamente sus condiciones morfológicas (fig. 33) y anatómicas para su utilización concreta.

Sabiendo que el bambú es una gramínea, una hierba, así como lo es el césped o el trigo que crece de forma natural, perenne y rápida su condición desde el punto de vista biológico es muy diferente a la constitución de otras plantas como los árboles.

La complejidad de esta planta se puede observar, por ejemplo, en los nudos de la caña de bambú (las líneas horizontales que se observan en la parte externa de la caña que son interrupciones en su vacío interior), donde aún no se conoce la ley que ordena sus fibras y su anatomía (Londoño, 2002).

A estas gramíneas de gran escala, se las puede encontrar en diversas zonas templadas y tropicales principalmente de Asia y América (Londoño, 2002).

El bambú se distribuye en el mundo a lo largo del eje del Ecuador y entre los dos Trópicos principalmente. Dentro de esa franja natural de crecimiento, se pueden encontrar especies nacidas en zonas altas

Fig. 34 Bambú *Dendrocalamus asper* (a la izquierda) y *Guadua angustifolia* Kunth (a la derecha), las dos imágenes tomadas en Ecuador. Fotografías de Hui, Chaomao, 2002.
YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), (33).

Fig. 35 Imágen de bambúes *Phyllostachys* cubiertos de nieve
Yiping, L., Yanxia, L., Buckingham, K., Henley, G., & Guomo, Z. (2010). Bamboo and climate change mitigation.

de montaña y especies que corresponden a bajas latitudes y climas templados. Cada una desarrolla su anatomía en consecuencia a las condiciones de su entorno y al tipo de suelo, esto a la vez ofrecerá diferentes opciones a la hora de trabajar con las cañas en arquitectura.

“En el mundo existen un total de 90 géneros y 1100 especies, que se distribuyen desde los 51º de latitud Norte (Japón) hasta los 47º de latitud Sur (Chile) y desde el nivel del mar hasta los 4.300 metros de altura reportada en los Andes ecuatoriales en la formación conocida como Páramo” (Londoño, 2002).

Se los puede encontrar en zonas húmedas, aunque también habitan zonas altas con bajas temperaturas o selvas mas nubladas con poco sol (figuras 34 y 35)(Londoño, 2002).

Para clasificarlos es necesario conocer la familia, subfamilia, Tribu, Subtribu, Género y Especie, de manera que así entendemos sus propias características tanto anatómicas como físico-mecánicas.

Taxonómicamente² el bambú pertenece a la familia Poaceae, a la Subfamilia Bambusoideae, la Tribu puede ser Herbáceos u Olyrodae, o Leñosos o Bambusodae.

Con la altitud (en referencia al nivel del mar) van variando las especies adaptándose a las condiciones climáticas.

“Por debajo de los 1000 m de altitud, la diversidad disminuye registrándose un mayor incremento en el número de individuos a nivel de especie y un predominio de los géneros *Arthrostylidium*, *Guadua* y *Rhipidocladum*. Por encima de los 3000 m únicamente se encuentran especies de los géneros *Chusquea*, *Neurolepis* y *Aulonemia* (Clark, 1989, 1993; 2001; Londoño, 1990)” (Londoño, 2002).

Conocer la anatomía del bambú (fig. 36) con la que se trabaja permite entender las posibilidades que ofrece en referencia a solicitaciones, durabilidad, radio de curvatura, etc. Grosser & Liese (1971) realizaron investigaciones que ponen en evidencia las diversas estructuras anatómicas diferenciando los géneros y distintas especies, demostrando la importancia de la identificación taxonómica de los culmos (cañas) (Londoño, Camayo, Riaño, & López, 2003).

² La definición de taxonomía por la RAE es: Ciencia que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación. Se aplica en particular, dentro de la biología, para la ordenación jerarquizada y sistemática, con sus nombres, de los grupos de animales y de vegetales. Clasificación: acción y efecto de clasificar.

Fig. 36 Modelos tridimensionales de la morfología global y de las fibras del bambú, tienen como objetivo de reproducir la densidad y el tamaño de las fibras a lo largo de la caña.

Weinstock, M. (2006). *Self-organisation and the structural dynamics of plants*. *Architectural Design*, 76(2), 26–33.

Clasificación taxonómica

Tribus: Herbáceos y Leñosos

Los bambúes Herbáceos son los que crecen en las zonas de selva tropical y subtropical, desde los 29° Latitud Norte hasta los 34° Latitud Sur, a alturas menores a 1000 metros. La polinización se realiza por insectos. Se cuantifican 20 géneros y 106 especies de esta Tribu (Londoño, 2002).

Los bambúes Leñosos son los más numerosos y dispersos, crecen entre los 51°N y los 47°S, hasta los 4.300 metros de altura sobre el nivel del mar, en hábitats abiertos polinizados por el viento. Existen 61 géneros y hasta 900 especies (Londoño, 2002).

Los bambúes leñosos (fig. 37) tienen sus propias características que los distinguen como fuertes rizomas desarrollados, cañas lignificadas, hojas caulinares que protegen los brotes nuevos, complejo sistema de ramificaciones y cuerpos silíceos. Estos se ubican principalmente dentro del continente Americano a lo largo de la Cordillera de los Andes.

El concepto de sinonimia en taxonomía

La clasificación botánica mediante la taxonomía es una práctica universal, lo que produce a lo largo del tiempo la duplicación de las mismas especies con diferente nombre. La sinonimia³ es por lo tanto la repetición de la denominación. Dos o mas nombres aplicados al mismo taxón se conoce como sinónimos.

El principio de prioridad establece que cuando dos o más nombres compiten para el mismo taxón, en general, el más antiguo es considerado como el correcto, el primero publicado válidamente. El principio de prioridad adquiere importancia cuando una especie sufre un cambio de posición taxonómica. El ICBN (The International Code of Botanical Nomenclature⁴) es el compendio internacional de reglas que rigen la taxonomía de los organismos vegetales, este normaliza los nombres de los taxones y establece cómo determinarlos.

La clasificación de bambúes admite cambios taxonómicos, diferentes representaciones que llevan a la utilización de sinónimos (Bedell, 1997).

3 En el Congreso de 1868 en París se acordaron las reglas internacionales de sinonimia estableciendo el derecho de prioridad respecto a los nombres mas antiguos desde 1753, en que apareció la primera edición de *species plantarum* de Linneo.

4 Los nombres se designan en Latín como lenguaje Universal.
<https://www.iapt-taxon.org/icbn/main.htm>

Fig. 37 Arquitecta Anna Heringer. Imágen de las construcciones Three Houses para la Bienal de bambú, China, 2016. Construcciones tejidas con bambú leñoso de China, Autor de la fotografía: Julien Lanoo www.arquitecturaviva.com (20190905)

2.2.2. Cronología de la clasificación taxonómica del bambú

Los nombres otorgados a las plantas, en su mayoría, son una referencia a sus descubridores y estudiosos. Es por ello que el conocimiento histórico evolutivo de los descubrimientos de especies va ligado hasta la actualidad a sus nombres.

Bedell (1997) describe la evolución histórica de la toxonomía del bambú que se refiere a continuación:

1750-1839

Los primeros intentos de detallar el bambú de forma botánica aparecieron por Rumphius (1750) quien describió y nombró algunos bambúes en su publicación llamada "Herbarium Ambionense"(figura 38). Mas tarde en 1789 la especie *Bambusa arundinacea* de India fue descrita por Schreber. Mas de cuatro décadas después en 1837 Blanco describió muchas especies de plantas de Filipinas incluidos bambúes.

En 1839 Ruprecht publicó una monografía sobre bambúes en la cual describe 18 especies de la región de Malasia. Su estudio se basó principalmente en especies herbáceas.

Munro 1868

Esto fue continuado por el trabajo mas extenso de Munro que publicó una monografía sobre Bambuseae en el Trans Linean Society Journal Vol. XXVI 1868.

Kurz 1876

En 1876 Kurz por primera vez estudió los bambúes como especies que viven en el campo, considerando el entorno como parte de su estudio, y reconoció la importancia de las características vegetales como las vainas de las cañas (los grupos de fibras que confoman su anatomía). Sin embargo, no hizo una propuesta formal de clasificación del bambú.

Gamble 1881

En 1881 Gamble estudió el bambú de India, Birmania y Malasia y publicó una monografía sobre Bambuseae en la India Británica que aún es un trabajo fundamental en cuanto a los bambúes de India. Reconoció 14 géneros y su trabajo contiene una explicación sistemática integral de

Fig. 38. Publicación *Herbarium Ambionense*, Rumphius (1750)
durianinfo.blogspot.com

Figure 19. 1-10. *Bambusa intermedia* Hsueh & T. P. Yi. 總竹 mian zhu. —1. Portion of culm. —2. Leafy branchlet. —3. Abaxial view of culm sheath. —4. Flowering branchlet. —5. Lemma. —6. Glume. —7. Palea. —8. Lodicule. —9. Pistil. —10. Stamen. 11-19. *B. emeiensis* L. C. Chia & H. L. Fung. 慈竹 ci zhu. —11. Portion of culm and leafy branchlet. —12. Abaxial view of culm sheath. —13. Spikelet. —14. Glume. —15. Lemma. —16. Palea. —17. Lodicule. —18. Pistil. —19. Stamen. (FOC 32, 34; FRPS 9(1): 116, 132, pl. 32. 1996. —李楠 Li Nan; reproduced from 吴征镒 Wu Zhengyi (ed.), Fl. Yunnan, 9: 25, pl. 4. 2003).

Figure 219. 1-4. *Phyllostachys meyeri* McClure. 毛环竹 mao huan zhu. —1. Flowering branchlet. —2. Portion of culm. —3. Abaxial view of culm sheath. —4. Adaxial view of culm sheath. 5-7. *P. aurea* Carrière ex Rivière & C. Rivière. 大面竹 ren mian zhu. —5. Lower portion of culm, showing contracted internodes. —6. Abaxial view of upper portion of culm sheath. —7. Adaxial view of upper portion of culm sheath. (FOC 168; FRPS 9(1): 255, pl. 67. 1996. —蔡淑琴 Cai Shuqin).

Fig. 39..Dibujo de botánica de Sinocalamus affinis

Fig. 40 Dibujo de botánica de Phyllostachys aurea

Representaciones gráficas de los géneros y especies identificando las hojas de la planta, las yemas y las cañas.

www.tropicos.org (20160809)

todas las especies conocidas en el momento de la publicación, en total 151 especies. Dividió los bambúes en 4 subtribus (i) Arundinareae, (ii) Eubambuseae, (iii) Dendrocalameae, (iv) Melocanneae.

Bentham 1883

En 1883 Bentham adoptó el sistema de Munro de clasificación como base de su revisión sobre la clasificación de bambú. Su trabajo, que se publicó en *Genera Plantarum* vol.III, es considerado como un trabajo de notable integridad. Describió 18 géneros de los cuales 15 fueron de la región Malasia y el resto del sur de América.

Stapf 1897

En 1897 Stapf clasificó los bambúes en cinco subtribus. Su clasificación se basó en las características del fruto, y la naturaleza de su anatomía. Definió 5 subtribus: Dendrocalameae, Melocanneae, Bambusineae, Arundinareae, Puellineae.

Camus 1913

En 1913 los bambúes de Indo-China fueron descritos por Camus. Adoptó el sistema de Munro de clasificación y publicó el trabajo titulado “*Les Bambusees*”. Trató el bambú como una subfamilia de Gramineae y lo dividió en 5 Tribus y 4 Subtribus.

Brandis 1921

En 1921 Brandis desarrolló la clave para identificar 14 géneros de bambú basados en el hábitat de la caña, el tamaño de la caña, las características de la hoja, las características de la flor y el fruto, y las características de la semilla (fig. 39 y 40).

Backer 1924., Agnes Arber 1926, Camus 1935. y Holttum 1945-1956 desarrollaron investigaciones en referencia a la identificación de bambúes.

Raizada y Chatterjee 1963

En 1963 Raizada y Chatterjee trabajaron en Forest Research Institute de

Geographical area		Subtribes	Genera	Species	(×10 ⁴ ha)
Regions	Asia	6	45	600	1289
	Africa	2	14	50	150
	Pacific and Australia region	2	6	10	20
	Americas (N, C, S)	4	21	430	150
	Total	9	90	1200	
Countries	China		40	500	
	Yunnan, China		30	250	
	India		19	150	400
	Myanmar		17	90	217
	Thailand		12	50	100
	Bangladesh		13	30	510
	Japan		13	230	12.3
	South Korea		10	13	0.8
	Indonesia		9	30	6.0
	Vietnam		16	92	3.0
	Philippines		12	55	0.8
	Malaysia		7	44	2.0
	Sri Lanka		7	14	0.2
	Madagascar	2	6	20	

Fig. 42 Distribución geográfica de bambúes.

YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). *China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)*, (33).

Dehradun, para la idiferenciación de especies de bambú basadas en las vainas de la caña.

Fujimoto 1966 y McClure 1996

En 1966 Fujimoto basó su clasificación sobre Bambusoideae teniendo en cuenta la estructura de las hojas. Otro trabajo significativo sobre bambú fue el escrito que apareció el mismo año titulado “Bamboos a Fresh Perspective” por McClure. Establece que todas las partes de las características vegetales y la estructura floral pueden ser utilizadas para la clasificación.

Ghosh y Negi 1960

Los estudios llevados a cabo por Pattanath y Rao fueron la continuación de los que habían realizado Ghosh y Negi en 1960 quienes se concentraron sobre todo en las características de la epidermis de la caña de una limitada cantidad de seis especies de bambúes de los géneros *Bambusa*, *Dendrocalamus* y *Melacanna*.

Pattanath 1965. Pattanath y Rao 1969

Un estudio mas detallado fue desarrollado por Pattanath, y Pattanath y Rao sobre 17 especies de bambú y 11 géneros.

Grosser y Liese 1971

Grosser y Liese⁵ trabajaron sobre 52 especies de bambú y 14 géneros de diferentes países de Asia. Un estudio en detalle sobre las estructuras de los entrenudos de las cañas que se hizo sobre 1200 entrenudos de 250 cañas. El estudio se centró alrededor de los haces vasculares y el parénquima en los entrenudos. Encontraron que la forma de los haces vasculares (fig. 41) difiere de especie a especie confirmando lo encontrado antes por Pattanath y Rao en 1969.

Grosser y Liese reconocieron 4 tipos básicos de haces vasculares.

Fig. 41 Imágen microscópica con aumento de 20x del haz vascular de la cara externa, cara media y cara interna del bambú *Guadua angustifolia* Kunth. (Torres, 2011)

5 El Doctor en estudios forestales Walter Liese es Profesor de la Universidad de Hamburgo. Tiene numerosos estudios científicos sobre aspectos biológicos de la madera y el bambú. Realizó la clasificación de los haces vasculares de los géneros de bambúes que permite clasificarlos de modo anatómico hasta la actualidad.

Fig. 43 Distribución vertical del crecimiento del bambú en Yunnan, China.
YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-
International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), (33).

Bahadur 1979

En 1979 Bahadur trabajó en Forest Research Institute Dehradun India, desarrollando la clave para identificar los bambúes basándose en los brotes de las cañas y de las vainas.

Hiroshi Usui 1985

En 1985 Hiroshi trabajó sobre los bambúes de Japón pertenecientes a 23 especies de 6 géneros.

Wen Taihui y Chou Wenwei 1985

Estudiaron la anatomía de los haces vasculares de 99 especies pertenecientes a 28 géneros de las provincias de China. Categorizaron los haces vasculares del bambú en 5 tipos: doble roto, de cintura delgada, semi abierto y abierto. Encontraron que los haces vasculares varían mucho dentro de la caña en los entrenudos.

Zhang Guang Zhu 1985 y Chen Fu Qui 1985

En 1985 Zhang Guang Zhu hizo un estudio sobre el número de cromosomas de algunas especies de bambú.

Zhang Guang Zhu 1985 y Chen Fu Qui 1985 realizaron estudios de híbridos de bambú.

Lalita Kumari 1985

Este estudio sugirió una nueva aproximación a la identificación del número de diferentes especies basado en resolución electroforética (técnica para la separación de moléculas según la movilidad de estas en un campo eléctrico).

1986 / actualidad

En esta década creció la utilización en pequeña y gran escala de las industrias vinculadas al bambú. Se formaron sociedades del bambú en diferentes partes incluyendo Japanese Bamboo Society, American Bamboo Society, European Bamboo Society, Indian Bamboo Society, Asociación Colombiana del Bambú, etc. y centros de información sobre bambú. Esto está dando como resultado un gran número de

Fig. 44 Mapa mundial con las zonas de crecimiento del bambú
YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), (33).

publicaciones, que describen nuevas especies, nomenclaturas, revisión de géneros y especies, estudios de taxonomía, etc.

2.2.3. Patrones de distribución geográfica

“Habitualmente hay un área o mas con marcada concentración de un género o especies. Esta área se conoce como “densidad de centro genético” del género” (Bedell, 1997).

Quereshi y Deshmukh (1962) describen en sus escritos que los bambúes buscan zonas lluviosas desde 1270 mm hasta 6350 mm. Aunque se pueden encontrar diversas especies que crecen en zonas mas secas, con menor cantidad de lluvias, como son *Dendrocálamus strictus*. Las especies tienen gran relación con los tipos de suelo, que tienen que ver con el drenaje, la humedad del ambiente, la temperatura media del sitio, vinculado con la altitud todo ello engloba un hábitat (fig. 42, 43 y 44). Bedell (1997) describe que la altitud determina el desarrollo de diferentes especies en la región de Bengal (Himalaya) como son *Dendrocalamus hamiltonii* al norte, *Bambusa tulda* en el centro de las regiones y *Melacanna bambusoides* que crece en el sur.

“Estas son presumiblemente las razones por las que una especie ocupa un hábitat característico y raramente se mezcla con otras especies de bambú, excepcionalmente *Bambusa tulda* se asocia con *Cephalostachyum capitatum* y *Oxytenanthera* con otras cañas”(Quereshi y Deshmukh, 1962).

El 85% de los bambúes de Tribu Herbácea del mundo se encuentran desde México hasta Argentina, zona del Trópico, incluyendo a Brasil con mayor variedad de especies (fig. 45 y 47). La Subtribu de los bambúes Leñosos (fig. 46), incluye sólo la tribu Bambusae la cual un 40% crece en América, distribuidas hasta los 4000 msnm y desde 46° de latitud Norte hasta 47° de latitud Sur (Londoño, 1990).

En particular, los estudios sobre morfología y distribución del bambú en Japón se realizan desde el año 1900 por el botánico Makino, y durante los años '30 del S. XX la distribución del bambú en las prefecturas de Japón fue investigado por Nakai (1933-1935) y Koidzumi (1934-1943), quienes clasificaron taxonómicamente nuevas especies (Lessard & Chouinard, 1980).

Fig. 45 *Guadua angustifolia* Kunth
Klop, A., Cardenas, E., & Marlin, C. (2003). Bamboo production chain in Ecuador. *Journal of Bamboo and Rattan*, 2(4), 327-343.

Fig. 46..Mapa mundial con la representación de las zonas de crecimiento de bambúes herbarios (Olyrae)

Fig. 47..Mapa mundial con la representación de las zonas de crecimiento de bambúes leñosos (Bambusodae)
www.eeob.iastate.edu/research/bamboo/maps.html (20190814)

Según el estudio de dos especies de bambú con mas presencia en Japón son *Phyllostachys reticulata* C. Koch también conocida como *Phyllostachys bambusoides* Sieb y *Phyllostachys edulis* Makino cuyo nombre local es Mosochiku. Estas dos especies ocupan el 84% del total del área ocupada por bambúes (Lessard & Chouinard, 1980). En China el bambú *Phyllostachys edulis* Makino “Mao Zhu” también conocido como bambú Moso cubre la mayor parte del mercado forestal local y alcanza el 2% del total forestal de China, cubriendo 3 millones de hectáreas (Fu, 2001).

En América del sur se destaca la *Guadua angustifolia* Kunth (figura 50) que es un bambú leñoso y que lleva este nombre por el botánico Karl Sigismund Kunth⁶.

2.2.4. Anatomía del bambú

Características generales

“El bambú es un compuesto. Es un compuesto de material suave y débil, rígido y fuerte, el bambú está formado al principio por celulosa y luego por la lignina” (Janssen, 2012).

Los bambúes son conocidos como “acero vegetal” por su dureza y resistencia, pero a la vez ofrecen flexibilidad y permiten su curvatura.

A lo largo de la caña de bambú se advierten cambios en su estructura anatómica. Sus haces vasculares⁷ modifican su forma, tamaño y densidad (figura 51) en los diferentes segmentos desde la base hasta el ápice (Londoño, Camayo, Riaño & López, 2003).

Rizomas

Son los tallos subterráneos de la planta. Cuando las nuevas cañas se desarrollan los nuevos rizomas también. Las sustancias, los carbohidratos que reciben los nuevos rizomas vienen de las viejas

6 Karl Sigismund Kunth estudioso de la botánica, en 1822 estudió este bambú y definió un nuevo género que fue la *Guadua*, proveniente de una palabra nativa de Colombia y Ecuador.

7 El tejido conductivo de la planta.

Fig. 48..Rizoma de bambú paquimorfo o simpodial

Fig. 49 Rizoma leptomorfo o monopodial

Xiaobing, Y. (2007). *Bamboo: Structure and Culture: Utilizing Bamboo in the Industrial Context with Reference to Its Structural and Cultural Dimensions*. Doctoral Dissertation, Fachbereich Kunst und Design der Universität Duisburg.

Original: McClure 1966

Fig. 50 Rizomas paquimorfo (a) y Leptomorfo (b)
Banik, R. L., & others. (1995). A manual for vegetative propagation of bamboos. International Network for Bamboo and Rattan..

cañas y de la absorción.

Los rizomas son nudos y entrenudos con una epidermis de abundante sílice. Se distinguen tres tipos de rizomas con características bien diferenciadas:

_ *Paquimorfo o simpodial*

Son los rizomas con mayor antigüedad⁸ (fig. 48 y 50).

Conforman un sistema en red. Son raíces cortas y gruesas de mayor diámetro que la caña y con entrenudos mas anchos que largos. Las yemas se transforman únicamente en rizomas (McClure, 1966, 1973) (Londoño, 2002).

Son plantas mas compactas y definidas, todas las cañas crecen a poca distancia.

Son principalmente bambúes de zonas tropicales de América, Asia, África y Oceanía. Géneros como *Guadua*, *Dendrocalamus* y *Bambusa*. Se los conoce como los “bambúes fuertes” por tener mayor densidad de fibras por unidad de volumen (gravedad específica).

_ *Leptomorfo o monopodial*

Bambúes mas evolucionados (fig. 49 y 50).

Son largos y finos. Algunos de sus brotes se convierten en nuevos tallos y otros en extensión del rizoma. Las yemas crecen desde los nudos. Son raíces de forma cilíndrica con diámetro menor al de la caña (McClure, 1966, 1973)(Londoño, 2002).

Son principalmente bambúes de zonas templadas. Géneros como *Phyllostachys*. Se los conoce como “bambúes blandos”.

_ *Amfimorfo o amapodial*

Es la combinación de los dos anteriores, tienen la capacidad de mezclar dos tipos de rizomas. Pueden germinar brotes en la base de la caña directamente en tallos nuevos o generar rizomas (McClure, 1966, 1973) (Londoño, 2002).

Los rizomas forman parte de la conservación y estabilidad de los suelos donde el bambú crece. Por su compleja red bajo tierra evitan la erosión

⁸ Son bambúes con más cormosomas que los leptomorfos. Los paquimorfos tienen $2n=72$, mientras que los leptomorfos tienen $2n=48$. Los bambúes con menor número de cromosomas se consideran especies mas evolucionadas.

Brea and Zucol — Petrified Bamboo Culm of the Pliocene

Fig. 51 Dibujo de la sección transversal de la anatomía de la *Guadua zuloagae* donde se muestran las diferentes caras de una caña de bambú: el exterior, el medio y el interior y la variación de los haces vasculares en relación a estas.

Lybeer, B., & Koch, G. (2005). Lignin distribution in the tropical bamboo species *Gigantochloa levis*. *Iawa Journal*, 26(4), 443–456.

de los suelos y desprendimientos de las laderas, es por esto que son considerados de importancia en terrenos con pendiente.

“La especie asiática *Phyllostachys aurea* (leptomorfo), forma una red bajo la tierra tan fuerte y densa, que a veces no deja ni penetrar la lluvia; estas especies con sistemas de rizoma leptomorfo son ideales en la conservación de laderas muy empinadas. La *Guadua angustifolia* (paquimorfo) aunque forma una red menos densa, y permite más la percolación del agua, ayuda también a controlar la erosión amarrando el suelo y los barrancos a la orilla de ríos y carreteras”(Londoño, 2002).

Los bambúes con rizoma leptomorfo o monopodial son los mas utilizados para realizar subdivisiones y cortes de la caña por la distribución en vainas o grupos de sus fibras internas. Los rizomas tipo paquimorfo o simpodial presentan una disposición de fibras mas aisladas, es decir sus haces vasculares se presentan como haces de fibras aislados (Liese, 1998) (Londoño, 2002).

La cara exterior, la corteza

“La corteza es la parte externa del culmo y sus funciones son prevenir la pérdida de agua y proteger el tejido. La corteza está compuesta por epidermis y la hipodermis”(Liese, 1998).

La epidermis tiene células grandes largas y cortas mezcladas. Células de corcho y de sílice, que según la especie tiene distinto porcentaje y contribuyen a darle dureza a la capa en contacto con el exterior. Se puede decir que en los bambúes el sílice aumenta hacia arriba en la caña y hacia la cara exterior de esta (Archila, Pesce, Ansell & Ball, 2015)

Londoño (2002) explica que la denominación “maximización del radio por giro” se refiere a la concentración de fibras en la cara externa de la caña de bambú, donde aumenta la densidad, su gravedad específica y por lo tanto su rigidez (figura 47).

El culmo o la caña

Fig. 53 Imágen microscópica de la epidermis, (A y B), de los haces vasculares, fibras y parénquima de un corte transversal (C) y de un tejido conductor de un bambú *Dendrocalamus latiflorus* (D). Montiel, M., & Sánchez, E. (2006). Ultraestructura de bambúes del género *Dendrocalamus* (Poaceae: Bambusoideae) cultivados en Costa Rica I: *Dendrocalamus latiflorus*. *Revista de Biología Tropical*, 54, 43-50

Es la parte vertical aérea emergente del rizoma. Está compuesto de tejidos y células. Las especies varían con las diferencias anatómicas que conforman las cañas de nudos y entrenudos⁹ (figura 52). Las células están principalmente orientadas de forma longitudinal salvo en los nudos que es donde se producen los cruces transversales (Liese, 1998) (Londoño, 2002).

Células parenquimatosas

Forman el mayor porcentaje de tejido interno de la caña, alrededor del 50% del total¹⁰. Su función es realizar la fotosíntesis y alimentar a la planta, además del intercambio de gases y almacenamiento de nutrientes. Son células largas (100x20 mm) que se lignifican y células cortas, se conectan entre sí por múltiples orificios (Liese, 1992, 1998) (Londoño, 2002).

Haces Vasculares

El tejido conductivo puede alcanzar un 8% del total de la caña (Liese, 1992, 1998) (Londoño, 2002).

Están compuestos por el floema, dos xilemas o metaxilemas y el protoxilema, todos separados entre sí por espacio intercelular ocupado el parénquima y las fibras. Son los tejidos conductivos del bambú. (Liese, 1992, 1998) (Londoño, 2002).

Al realizar un corte transversal a la caña de bambú lo que se observa es el tejido esclerenquimatoso¹¹, que es mas oscuro, rodeando los haces vasculares y en contraste con el parénquima (figuras 53, 54 y 55). La anatomía de cada especie se puede observar al realizar este corte donde quedan en evidencia el tamaños de los haces vasculares, la densidad, el tipo de haces y su distribución en el ancho de la pared (Liese, 1998).

Los tejidos conductivos formados por el xilema y floema están

9 Se definen como entrenudos a los espacios que quedan a lo largo de la caña definidos entre las interrupciones transversales de las fibras. Los entrenudos presentan fibras dispuestas de manera longitudinal a lo largo de la dirección principal de la caña.

10 Tejido esponjoso que rodea los haces vasculares y el tejido esclerenquimatoso.

11 Conjunto de fibras que rodean los haces vasculares.

Fig. 52 Imágen de la estructura anatómica del entrenudo
Liese, W. (1998). *The anatomy of bamboo culms*

Fig. 54 Imágen con microscopio del parénquima y de los haces vasculares de la parte central de la pared de la caña del bambú Moso
de Vos, V. (2010). *Bamboo for Exterior Joinery* (Doctoral dissertation, BSc Thesis, International Timbertrade, Larenstein University, The Netherlands).

Fig. 55 Imágen de un haz vascular
Liese, W. (1998). *The anatomy of bamboo culms*

Fig. 56 Los dibujos representan los haces vasculares de los bambúes *Chimonocalamus*, *Fargesia* y *Yushania*. Se representan los haces vasculares desde la cara externa (desde el lado izquierdo) hasta la cara interna (hasta el lado derecho) de la caña; y desde la basa hasta el ápice (A, B, C)
Liese, W. (1985). *Anatomy and properties of bamboo*. Bamboo Workshop Hangzhou (pp. 196–207).

presentes desde un principio en la planta pero a lo largo del tiempo estos conductos se van degradando y tapando por la presencia de limos y sustancias, lo que produce la muerte de la caña (Liese, 1998) (Londoño, Camayo, Riaco & López, 2003). Según Liese & Weiner (1996) una caña de bambú puede vivir hasta 15 años, en particular la *Guadua angustifolia* tiene una vida de 10 años aproximadamente (Castaño 1985, Londoño 1992).

La disposición de los filamentos de fibra y haces vasculares varía entre especies, entre secciones de una misma caña y entre regiones de la misma pared de un bambú (figura 56). Esto tiene implicaciones importantes para la clasificación y evaluación de las características físico-mecánicas del bambú. En todos los casos las fibras mas cercanas a los haces vasculares son mas cortas y las mas lejanas son fibras mas largas. Mediante un corte transversal al eje principal en el culmo¹² se observa que los haces vasculares son mas pequeños y mas numerosos en la periferia y hacia la parte interior son mas grandes y escasos (figura 56).

Grosser (1971) y Grosser & Liese (1971,1973) estudiaron las formas de los haces vasculares en 52 especies y 14 géneros que permitieron caracterizar 4 “tipos” de haces vasculares y a su vez clasificar y agrupar especies (Londoño, Camayo, Riaco & López, 2003).

La clasificación establecida por Liese (1998):

Tipo abierto (Tipo I): Los 4 haces vasculares son similares. Los que tienen este tipo de haces vasculares son bambúes monopodiales o ampodiales, en Géneros como *Phyllostachys*, *Arundinaria*, etc (figura 57 I).

Tipo cintura estrecha o de encuadernación (Tipo II): La vaina del haz vascular interna es notablemente mayor y se extiende a los lados. Se encuentran en bambúes con rizomas simpodiales (figura 57 II).

Tipo quebrado (Tipo III): Tiene un conjunto de tejido esclerenquimatoso aislado. Los haces tipo quebrado y doble quebrado muchas veces se encuentran combinados en la misma caña. En bambúes con rizoma simpodial. Existe sólo o combinado con el tipo IV (figura 57 III)..

Tipo quebrado doble (Tipo IV): Tiene fibras en la parte interna y externa del haz vascular aisladas. Está compuesto por dos partes de filamentos de fibra. Este tipo es el que contiene mayor cantidad de tejido esclerenquimatoso rodeando los haces vasculares. Los bambúes con este tipo de haces crecen agrupados, son simpodiales. Se encuentra

Fig. 57 Distinción de tipos de haces vasculares (Liese, 1971), tipo I, II, III, IV y V YuMing, Y., & ChaoMao, H. (2010). China's bamboo-culture/resources/cultivation/utilization. Technical Report-International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), (33).

12 Culmo: tallo aéreo o caña

Fig. 60 Gráfico que representa el porcentaje de parénquima, fibras y tejido conductivo en las tres partes de la pared del bambú *Phyllostachys makinoi*

Fig. 61..Gráfico que representa el porcentaje de parénquima, fibras y haces vasculares en los entrenudos del bambú *Cephalostachyum pergracile*
Liese, W. (1998). *The anatomy of bamboo culms* (Vol. 18). Brill.

en las paredes gruesas de los entrenudos de la base de los bambúes grandes y siempre en combinación con el tipo III (figura 57 IV).

Tipo semi abierto (Tipo V): Esta tipología no tiene fibras. Se encuentra en especies como *Sasa*, *Indosasa*, *Fargesia*, etc (figura 57 V)..

Dentro de la pared del culmo, el tamaño de los haces vasculares decrece de la base hacia el ápice mientras su densidad se incrementa (figura 56 y 58).

Fibras

Es el tejido de sostén, su función es dotar de fuerza a la caña. Constituyen el 40-50% del total del tejido de la caña y entre el 60-70% de peso de esta (Londoño, 2002)(Londoño, Camayo, Riaco & López, 2003) (Liese, 1992, 1998).

El *tejido esclerenquimatoso* es un conjunto de fibras. Mientras que la *fibra* es un individuo, generalmente es una estructura larga, delgada, ahuesada en ambas puntas.

Cuando se hace referencia al porcentaje de fibras en los haces vasculares se mide el área de esclerénquima, la parte que rodea al haz vascular que tiene paredes gruesas y está conformado por fibras.

Este tejido es relativamente elástico, si se deforma cuando la planta está con vida puede volver a su forma original, teniendo un comportamiento dúctil. Sus células tienen una morfología alargada y estrecha y sus extremos en punta, aunque estas características cambian según la especie (figura 59).

Las fibras deben sus características a la presencia de celulosa, hemicelulosa y hasta un 40% de lignina en sus paredes celulares. La lignina es una sustancia responsable de la fortaleza y rigidez, es inerte, resistente y estable. La lignificación de las fibras se produce desde fuera hacia adentro (Liese, 1992, 1998) (Londoño, 2002) (Londoño, Camayo, Riaco & López, 2003).

En el sentido horizontal las células conductivas (haces vasculares) y el parénquima son mas frecuentes en el tercio interno de la pared, mientras que en el tercio externo el porcentaje de fibras es notablemente mas alto (figura 60).

Fig. 58 Imágenes comparadas de dos cortes transversales de bambúes *Phyllostachys edulis* (haces vasculares tipo I) y *Thyrsostachys siamensis* (haces vasculares tipo IV). Se puede observar la diferencia en el ancho de pared de cada especie y la estructura anatómica. Liese, W. (1998). The anatomy of bamboo culms (Vol. 18). Brill.

Fig. 59 Imágen de una fibra de bambú *Gua-dua angustifolia* Kunth. Trujillo, E., Moesen, M., Osorio, L., Van Vuure, A., Ivens, J., & Verpoest, I. (2014). Bamboo fibres for reinforcement in composite materials: Strength Weibull analysis. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 61, 115–125.

Fig. 62 Dibujo que representa la disposición de las fibras en el nudo de un bambú, donde se ve el cambio de dirección.

Liese, W. (1998). The anatomy of bamboo culms (Vol. 18). Brill.

En el sentido vertical el porcentaje de fibra se incrementa de la base hacia el ápice mientras que el porcentaje de parénquima decrece (figura 61).

Generalizando, se pueden establecer porcentajes comunes en todos los tipos de bambúes, que rondan los siguientes datos: una caña de bambú está compuesta por alrededor de 52% de parénquima, 40% de tejido esclerenquimatoso, 8% de haces vasculares o tejido conductivo (Londoño, 2002) (Liese, 1998).

“Una cuarta parte de tejido esclerenquimatoso mas existe en la parte alta de la caña que en la base (32% en la base, 41% en la parte alta)” (Janssen, 2012).

Grosser & Liese (1971) indicaron que dentro de una misma caña de bambú existen grandes diferencias entre los haces vasculares. Observando un corte transversal se pueden encontrar haces vasculares mas pequeños y mayor densidad cuanto mas cerca estemos del anillo externo de la caña, mas hacia el centro aumenta el parénquima frente a los haces vasculares. Realizando un estudio desde la base de la caña hasta el ápice , se observa que el tamaño de los haces vasculares va disminuyendo pero incrementando su densidad. También pueden presentar mas de un tipo de haz vascular en una misma especie de bambú (Londoño, Camayo, Riaño & López, 2003).

El nudo

Se llama nudo a la interrupción que se observa en el sentido horizontal a lo largo de las cañas de bambú (figura 62). Los nudos se repiten en el eje longitudinal del bambú y crean zonas cerradas, vacíos llamados diafragmas, donde la planta almacena agua. Los entrenudos son las zonas de la caña entre nudo y nudo. La dirección de las fibras se modifica en los nudos que se disponen de forma transversal al eje principal de la caña. La estructura anatómica del nudo es mucho mas compleja que el entrenudo. Los haces vasculares se cruzan, se ligan y se vinculan. Hay cambios en la disposición de los haces vasculares por la posición y torsiones (Liese, 1998).

En el nudo disminuye la cantidad de tejido parenquimatoso, lo que sumado al cruce de fibras y ligaduras aumenta la rigidez en este punto de la caña. Las fibras son mas cortas pero la cantidad de lignina es mayor que en el entrenudo.

Table 1. Chemical composition of some bamboo (Tamolang et al. 1980)									
Species	H&cellulose (%)	Pentosans (%)	Lignin (%)	Alcoholbenzene (%)	Hot water (%)	1 % NaOH (%)	Ash (%)	Silica (%)	
<i>Gigantochloa levis</i>	62.9	18.8	24.2	3.2	4.4	28.3	5.3	2.8	
<i>Gigantochloa aspera</i>	61.3	19.6	25.5	5.4	3.8	22.3	4.1	2.4	
<i>Bambusa vulgaris</i>	66.5	21.1	26.9	4.1	5.1	27.9	2.4	1.5	
Range of values for 10 Indian bamboo species	- 21.5	15.1 32.2	22.0- 3.2	0.2- 6.9	3.4- 21.8	15.0- 3.2	1.7- 2.1	0.44	
Range of values for 10 Japanese, Burmese and Indonesian bamboo species	61.9- 70.4	17.5- 22.7	19.8- 26.6	0.9- 10.8	5.3- 11.8	22.2- 29.8	0.8- 3.8	0.1- 1.7	

Table 2. Chemical composition of <i>Phyllostachys pubescens</i> at different heights (Li 1983)							
	Holocellulose (%)	Pentosans (%)	Lignin (%)	Ash (%)	alcoholbenzene (%)	Hot water extracts (%)	1% NaOH (%)
upper culm	54.1	31.8	24.7	1.2	6.0	7.0	25.6
middle culm	53.6	30.8	24.5	1.2	7.6	8.5	27.6
lower culm	54.4	32.9	24.0	1.1	7.4	9.3	28.3

Fig. 63 La tabla 1 muestra una comparación de componentes químicos presentes en los bambúes y compara los porcentajes de distintas especies.

Fig. 64 La tabla 2 muestra una comparativa entre porcentajes de componentes químicos en la parte basal, media y ápice de una caña de bambú del género *Phyllostachys*.

Liese, W. (1985). *Anatomy and properties of bamboo*. Bamboo Workshop Hangzhou (pp. 196–207).

Hay estudios científicos que evalúan el efecto que puede tener en la resistencia mecánica del bambú la perforación o rotura del diafragma (es la parte interior del nudo que une las caras del bambú de forma horizontal). En el estudio realizado por Camargo García y Suarez Franco (2014) donde se experimentó con *Guadua angustifolia* para comprobar el efecto sobre la resistencia al corte y a compresión de la caña al perforar el diafragma se pudo comprobar que no hay cambios considerables y en algunos casos no hubo ningún cambio al realizarse¹³ (Camargo García & Suarez Franco, 2014).

Por lo que este tipo de experimentaciones vuelven a poner la atención en la rigidez que otorga la ley que ordena las fibras en el nudo y que es parte de las paredes de la caña en esos puntos. En relación al trabajo con tejidos de fibras de bambú, es de gran valor tener en cuenta que la caña mantiene sus destacables características físico mecánicas a pesar de que se trabaje con cortes en tiras.

2.2.5. Propiedades químicas

La lignina (fig. 63 y 64) es el mayor componente de las paredes de las fibras, parénquimas y haces vasculares y es responsable de las propiedades mecánicas. La lignina se incrementa durante la maduración del culmo, aunque en el caso del parénquima y las fibras durante el primer año sólo. El contenido de sílice es del 5% o mas que en otras plantas, varía según especies, este afecta y condiciona las propiedades de corte y de su masa (Liese, 1985).

Hay especies que se consideran mas “dulces” (como *Bambusa vulgaris* o *Gigantochloa scortechinil*) que otras por el contenido de almidón de la caña y esto cambia con la edad, ya que en los primeros años el nivel es mas bajo. Es en el parénquima donde mayormente se acumula el almidón, principalmente en los nudos y en el diafragma. En las fibras se puede encontrar almidón también. Su función es proveer de energía a las paredes celulares (Liese, 1998, 1985).

13 “En este estudio, mediante un experimento factorial, se evaluó el posible efecto que puede tener la perforación del diafragma en la resistencia al corte y a la compresión de los culmos. Adicionalmente su madurez fue incluida como otro factor (...). Los análisis de varianza no mostraron ningún efecto o cambio significativo ($p > 0.05$) en las propiedades mecánicas evaluada.” Camargo G. y Suarez F. (2014)

Fig. 65 y 66 Proceso de secado de bambúes y cortes realizado por el arquitecto - artesano Ueno Masao

Realización de corte longitudinal a la mitad de la caña (Ueno Masao)

www.bamboouenomasao.com (20190905)

2.2.6. La preparación del material vegetal para el trabajo en construcción

Los bambúes se protegen de insectos y ataques xilófagos al tener una epidermis dura y cubierta por una capa cerosa, que a la vez evita la evaporación de agua de la planta. La epidermis tiene un alto contenido en sílice y lignina, que protege a la planta, pero que también la hace impermeable a la curación química que se le da para su preservación si está en contacto poco tiempo.

La preservación química se les da a las cañas de bambú previamente a su uso para construcción o para artesanías y se realiza desde dentro hacia afuera de la planta.

Las costumbres culturales establecen diferentes tradiciones según las zonas que tienen que ver con la preservación de los bambúes desde el momento del corte, como son las fases de la luna, la hora del corte (el corte por la noche evitará que la planta comience con sus funciones metabólicas a absorber agua y el contenido de humedad es menor), etc.

Se sabe que los cortes de las cañas deben hacerse en luna menguante, relacionado con el contenido de humedad de la planta, esto se basa en la ley de la gravitación universal donde se demostró que la fuerza gravitacional aumenta y decrece ligada a las fases de la luna y afectando a las plantas en el contenido de humedad que aumenta en luna llena y creciente.

Una vez cortadas las cañas se dejan en el bambusal de forma vertical, aisladas del suelo, donde están dos semanas, lo que hará que pierdan agua y humedad, que transformarán el almidón en compuestos fenólicos, es un proceso conocido como “avinagrado” por el olor que adquiere, que evitará los ataques de agentes biológicos (aunque posteriormente se refuerza la protección con curación química). Posteriormente se dejan curar al sol (fig. 65 y 66).

Todo este proceso se realiza previamente a la curación química.

El tratamiento mas utilizado es por inmersión. Las cañas se sumergen en una solución conocida como pentaborato¹⁴. Previamente los diafragmas (las separaciones interiores del bambú a la altura de los nudos) de la caña deben ser agujereados así la solución entra en todos los entrenudos huecos. En el caso de los bambúes que se hayan

14 Petaborato: combina agua, ácido bórico y bórax

Age of culm sections	Position on the culm	Crushing strength Kg/cm ²	Fiber stress at proport. lim .Kg/cm ²	Modulus of elasticity Kg/cm ²	Moisture content %	Specific gravity
1 to 3 years	Lower section	maximum 381.20	265.00	85.714	26.58	-----
		average 318.34				
		minimum 255.48	185.00	42.500	63.75	-----
3 to 5 years	Midle section	maximum 482.40	395.00	89.286	16.16	0.686
		average 389.15				
		minimum 295.91	230.00	84.000	28.88	0.651
	Lower section	maximum 502.42	385.00	62.216	42.56	0.666
		average 445.80				
		minimum 389.19	290.00	55.555	41.50	0.634
More than 5 years	midle section	maximum 629.73	550.00	124.038	16.06	0.797
		average 491.30				
		minimum 352.88	270.00	65.909	27.72	0.583
	Lower section	maximum 505.45	432.50	77.344	37.16	0.612
		average 408.61				
		minimum 311.78	275.00	58.871	42.57	0.578
	middle section	maximum 549.31	465.00	130.555	14.13	0.787
		average 438.15				
		minimum 327.00	255.00	78.333	18.87	0.666

Source: Martin, Mateus-Hidalgo (1981) -Number of tests 90- The top section of the culm was not sended from the farm

Fig. 67 La tabla muestra la como varía la resistencia mecánica con la edad del bambú, se evalúa la compresión paralela a las fibras en los entrenudos de la parte basal, media y ápice de la *Guadua angustifolia* Kunth.
Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Hidalgo.

Fig. 68 La primera imagen de microscopio muestra las fibras de un bambú *Phyllostachys viridiglaucescens* de 1 año de edad.

Fig. 69 La segunda imagen muestra las fibras de la misma especie de bambú con 12 años de edad, donde se puede ver como se engrosan las paredes de las fibras
Liese, W. (1998). *The anatomy of bamboo culms* (Vol. 18). Brill.

cortado aún no maduros, la penetración de la solución se hace también a través de las paredes del culmo ya que está relacionado con el grado de lignificación de la planta. Se dejan sumergidas alrededor de una semana (Londoño, 2002).

Posteriormente se dejan secar al sol de forma vertical o con secado artificial en procesos industriales.

El curado y el corte están directamente relacionados con el uso y la durabilidad, pero también se relacionan con el grado de flexibilidad que se busque, ya que una caña recién cortada utilizada para realizar entramados ofrece mayor flexibilidad que un bambú seco, sobre todo al utilizar la caña entera o cortes de $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ de la caña.

Para la realización de tejidos a escala de cestería y escultura el arquitecto y artista Ueno Masao¹⁵ realiza todo el proceso de curación expuesto anteriormente. Su trabajo se realiza mediante cortes de fibras de 1/128 partes de una caña de bambú Asiático, que por la dimensión de las fibras con las que trabaja el secado no afecta a la flexibilidad.

El equipo Cave Urban de Australia para la construcción de edificaciones mediante entrelazados de bambú utilizan las cañas de *bambú Moso y Madake* de 3 a 5 años de edad recién cortadas por la flexibilidad que obtienen en cortes de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de caña (con diámetros de 12 cm a 6 cm), lo que les permite realizar construcciones con durabilidad de entre 4 y 5 años (Cave Urban, 2017).

El secado de la caña provoca también que el material se contraiga, lo cual es importante tenerlo en cuenta cuando se utiliza el bambú para construcción o para la realización de tejidos, ya que en este último caso puede afectar al grado de rozamiento en los nudos y a la densidad de las fibras de entrelazado, además la facilidad de curvar la caña se modifica en bambúes secos (fig. 71).

2.2.7. Cambios que se producen en el proceso de crecimiento

Al observar las cañas de bambú se pueden identificar algunos aspectos que denotan el paso del tiempo de la planta. Algunos como la presencia de líquenes en la caña, el oscurecimiento de la superficie, la pérdida

¹⁵ Ueno Masao: Arquitecto por Shibaura Institute of Technology, estudió el uso del bambú con Honma Kazuaki. Su trabajo fue incluido en "The 20 th Contemporary Art Exhibition of Japan" en el Metropolitan Museum of Art de Tokyo. Trabaja con bambú Madake seleccionado de las montañas de Japón. Utiliza software de diseño para las realización de sus trabajos.

Internode including 2 nodes	Species	Internodes of basal part	Modulus of elasticity Kg/cm ²	Modulus of rupture Kg/cm ²	Compres. strength Kg/cm ²	Tensile strength Kg/cm ²
7	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	1	172,097	1828	602	1836
		3	122,463	1758	619	1946
		5	147,912	1827	640	1880
		7	130,352	2880	646	1966
		Average	143,206	1823	627	1907
5	<i>Dendrocalamus asper</i>	1	122,073	1637	639	2145
		3	149,587	1741	592	2040
		5	129,542	1595	622	2220
		7	123,966	1578	566	2104
		Average	131,292	1638	605	2127
3	<i>Gigantochloa robusta</i>	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
1	<i>Bambusa vulgaris var. striata</i>	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 Sjaifii, 1984) in Widjaja & Risyad (1985)

Proposed mechanical properties for structural bamboo

Bamboo species	Compression		Bending	
	Dry	Wet	Dry	Wet
<i>Bambusa pervariabilis</i> (Kao Jue)				
Characteristic strength (N/mm ²) (at fifth percentile)	$f_{c,k}$ 79	35	$f_{b,k}$ 80	37
Design strength (N/mm ²) ($\gamma_m = 1.5$)	$f_{c,d}$ 53	23	$f_{b,d}$ 53	25
Design Young's modulus (kN/mm ²) (average value)	$E_{c,d}$ 10.3	6.8	$E_{b,d}$ 22.0	16.4
<i>Phyllostachys pubescens</i> (Mao Jue)				
Characteristic strength (N/mm ²) (at fifth percentile)	$f_{c,k}$ 117	44	$f_{b,k}$ 51	55
Design strength (N/mm ²) ($\gamma_m = 1.5$)	$f_{c,d}$ 78	29	$f_{b,d}$ 34	37
Design Young's modulus (kN/mm ²) (average value)	$E_{c,d}$ 9.4	6.4	$E_{b,d}$ 13.2	9.6

Dry condition: m.c. <5% for both Kao Jue and Mao Jue. Wet condition: m.c. >20% for Kao Jue and m.c. >30% for Mao Jue. Linear interpolation is permitted for mechanical properties with moisture contents between dry and wet conditions. The shear strengths of both Kao Jue and Mao Jue are conservatively estimated as 0.25 $f_{c,d}$ but not less than 6 N/mm² and greater than 15 N/mm².

Fig. 70 La primera tabla muestra las diferencias en la resistencia mecánica en relación a la condición anatómica de la caña, ya que evalúa las diferencias según la disposición a lo largo de la vertical. de un bambú *Dendrocalamus asper*.

Fig. 71 Comparación de las propiedades de resistencia mecánica entre bambú con contenido de humedad y bambú seco Yu, W., Chung, K., & Chan, S. (2003). Column buckling of structural bamboo. *Engineering Structures*, 25(6), 755–768.

de hojas caulinares que recubren la caña, los patrones de las ramas, etc. hacen ver que la planta ya no es joven y puede aprovecharse para determinados usos. El engrosamiento de las paredes celulares de las fibras comienza por la parte interna de los haces vasculares y continua por la parte externa del parénquima. Este engrosamiento explica el aumento de densidad en las cañas de bambú de mayor edad (fig. 68 y 69) (Liese, 1998) (Londoño, Camayo, Riaco & López, 2003).

En relación a los cambios químicos que se producen con la edad en la planta, se pudo observar, que la lignina permanece estable desde el principio. Esto tiene como consecuencia que la dureza de la planta es un factor que está presente desde primera edad y no se modifica con los años. La celulosa decrece con la edad al igual que la homocelulosa (Londoño, Camayo, Riaco & López, 2003)

En las cañas con mas de 10 años de edad se ve afectado el sistema circulatorio, ya que el incremento de las paredes celulares obstruye las conducciones de agua.

Ubidia (2012) enumera: El crecimiento vinculado a las características químicas y anatómicas (fig. 67):

“-El bambú en su primera etapa de crecimiento y en su conformación orgánica, tiene mayor cantidad de almidón en sus células de parénquima.

-La resistencia del brote es mínima. La corteza o epidermis del mismo y las fibras inmediatas, son de espesor reducido.

-El bambú, en los primeros meses de su vida, se desarrolla velozmente hasta alcanzar su máxima altura; es decir, el poder de absorción de líquidos y nutrientes está en plena y máxima actividad.

-La savia y los líquidos ocupan los haces vasculares y conductores, los mismos que cumplen a plenitud sus funciones.

-Con el transcurrir del tiempo y al aumentar la edad del bambú, aumenta la densidad de los haces fibrosos inmediatos a la epidermis.

-La capacidad de resistencia del bambú se incrementa y progresivamente, sus células de parénquima se transforman, reducen su volumen y aumentan su densidad.

-La actividad fisiológica decrece y los vasos conductores al

A. Tensile strength (kg/cm ²)						B. Modulus of elasticity (kg/cm ²)				
Species	Layer	Lower section	Middle section	Upper section	Average	Layer	Lower section	Middle section	Upper section	Average
<i>Ph.bambusoides</i>	Inner	1.876,2	1.295,5	2,259.3	1,810.3	inner	219,375	170,461	262,413	224,083
	Outer	4.207,6	3.868,5	3.494.0	3,856.7	Outer	618,765	508,897	443,056	523,573
<i>Ph. nigra var. Henonis</i>	Inner	608,4	2.237,6	940.7	1.262,2	Inner	126,750	329,067	167,982	207,933
	Outer	2.383,2	3.128,3	1,632.4	2,381.3	Outer	590,600	605,442	453,444	549,895
<i>Ph. pubescens</i>	Inner	730,0	1.060,5	887.4	892.6	Inner	24,013	115,272	116,675	85,320
	Outer	3.254,0	3.166,4	2,532.5	2,964.3	Outer	135,583	494,750	381,250	337,194
<i>Ph. lithophila</i>	Inner	639,8	1.885,9	1.891.0	1,472..2	Inner	26,325	235,738	429,772	230,612
	Outer	2.094,9	4.269,4	2.946.0	3,103.4	Outer	84,452	533,675	669,544	429,224
<i>Dendrocalamus latiflorus</i>	Inner	506,5	1.007,3	1,057.9	857..2	Inner	55,054	185,145	154,397	130,865
	Outer	2.336,0	3.633,7	3,163.7	3,045.1	Outer	116,800	807,933	608,404	511,046
<i>Bambusa oldhamii</i>	Inner	1.621,8	2.046,5	2,614.6	2,094.3	Inner	224,694	292,357	344,026	287,026
	Outer	4.221,9	4.846,6	4,757.8	4,608.7	Outer	753,911	683,139	594,700	677,250
<i>B. stenostachya</i>	Inner	697,6	2.649,6	2,377.7	1,908.3	Inner	91,789	378,514	349,662	273,322
	Outer	3.836,0	2.957,5	2,407.3	3,066.9	Outer	532,778	434,926	316,663	428,122
<i>B. vulgaris var . vittata</i>	Inner	1.569,5	1.993,8	2,465.0	2,009.4	Inner	186,846	207,563	-----	197,204
	Outer	4.303,2	4.554,6	3.460.9	4,106..2	Outer	672,375	669,794	-----	671,085

Source: Sioti Uno (1930) Note: The original scientific names were corrected in the translation made by McClure

Fig. 72 La segunda tabla muestra la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad medio en diferentes especies. Hidalgo, O. L. (2003). Bamboo: The gift of the gods. O. Hidalgo-López

transformarse en haces fibrosos, disminuyen sus funciones originales.

-Desde su nacimiento, el bambú cambia paulatinamente en su aspecto exterior, lo que permite reconocer cuatro etapas bien definidas: nacimiento, desarrollo, madurez y vejez.

Las etapas mencionadas se manifiestan en las características exteriores del culmo.

- La edad del bambú es por tanto, un factor de su resistencia.”

“La examinación microscópica de fibras de esclerenquima de la sección de bambú puede ser una medida alternativa del análisis de fuerza de bambú para uso de la construcción.”
(Lo, Cui, Tang & Leung, 2008)

Desde el punto de vista arquitectónico, el factor de edad y especie determinan las características mecánicas de la caña (fig. 67, 68 y 69).

Hidalgo López (2003) considera que con la edad los bambúes alcanzan su máxima resistencia a compresión y flexión, pero no se considera de la misma forma para la tracción que no se presenta como norma (Hidalgo, 2003).

2.2.8. Relación entre las condiciones anatómicas de la caña y las propiedades mecánico - físicas

“La densidad y el diámetro del culmo pueden ser usados para predecir el módulo de ruptura y elasticidad”
(Londoño, 2002)

W. Liese (1998) determinó que las propiedades mecánicas de una caña de bambú se establecen por su estructura anatómica, es por ello que al conocer la especie con la que se trabaja se puede determinar su anatomía y sus posibles usos. La gravedad específica, la humedad contenida, la longitud de las fibras y el tipo de haces vasculares, entre otros factores, determinan la resistencia mecánica de la caña (Latif & Liese, 2001) (Londoño, 2002).

Existe una relación directa entre las características anatómicas de cada especie de bambú y las mecánicas de la caña (figuras 70 y 72).

Como es el caso de la gravedad específica donde “la densidad es la masa de material por unidad de volumen,

Resistencia a tracción		
Elemento ensayado	Esfuerzo de tracción a rotura (Kg/cm ²)	
	caña diam. 80cm	Caña diam 30 cm
Bambú (fibras externas)	3068 a 3273	3574 a 3843
Bambú (fibras internas)	1484 a 1633	1353 a 1947
Bambú (sección bruta)	1627 a 2151	2325 a 2758
Madera de coníferas	500 a 1500	
Madera de caducifolia	200 a 2600	
Seda	3500	
Lino	6000 a 11000	
Acero de construcción	3700 a 5200	

Módulo de elasticidad	
Material	Módulo de elasticidad (Kg/cm ²)
Bambú (caña entera solicitada a flexión)	200.000
Madera (no resinosa, solicitada a flexión)	110.000
Acero	2.100.000
Hormigón ordinario (a compresión)	220.000 a 360.000

Resistencia a compresión		
Sección de bambún ensayada	Esfuerzo a compresión Kg/cm ²	
	diam 60 cm	diam 32 cm
Paralelo a las fibras	636	863
perpendicular a las fibras	525 a 930	

Fig. 73 Comparación de las propiedades de resistencia mecánica entre diferentes materiales de construcción. Cuadros redibujados del original.

Resistencia a tracción paralela a la fibra y resistencia a compresión paralela a la fibra.

Barbaro, G. (2007). Transformación e industrialización del bambú. Barcelona, España: Arquitectura del paisaje. Obtenido de http://www.horticom.com/revistasonline/qej/bp155/08_15.pdf.

la gravedad específica es el ratio de densidad de material por la densidad de igual volumen de agua. La densidad del agua es 1 gr/cm³ en consecuencia, la densidad y la gravedad específica tienen el mismo valor” (Hidalgo, 2003)

La gravedad específica, que varía de 0,5 – 0,9 gr/cm³ (Hidalgo, 2003) depende del contenido de fibra, del diámetro de las fibras y del espesor de las paredes celulares, por lo que varía dentro del mismo culmo y especies. Ésta aumenta en los primeros tres años debido al engrosamiento de las paredes de las fibras. El tercio exterior de la caña, si se realiza un corte transversal al eje principal, es la parte con mayor cantidad de fibras y la gravedad específica es mayor que en el lado interior, al igual que a lo largo de la caña aumenta en la parte mas alta coincidiendo con las fibras y disminuye en la base (Londoño, 2002).

“La estructura fina de las paredes de fibras polilaminadas combinadas con paredes lignificadas del parénquima explican la resistencia a tracción que alcanza valores de 3800 N/mm² en la región periférica del culmo” (Londoño, 2002).

En los nudos las fibras son mas cortas, los haces vasculares están distorsionados y tienen mayor gravedad específica.

Widjaja & Risayad (1985) estudiaron las relaciones entre las características anatómicas y la resistencia mecánica de las cañas teniendo en cuenta los análisis previos realizados por Limaye (1952), Janssen (1981) y Kawase (1981), con especies como *Dendrocalamus giganteus*, *Gigantochloa robusta*, *Dendrocalamus asper* o *Bambusa vulgaris*, que determinaron que el ápice de la caña presenta mayor elasticidad que en su base, salvo en las últimas dos especies citadas. Deteniéndose en datos como la disminución de la resistencia a compresión hacia el ápice, al igual que el tejido esclerenquimatoso. Indican también que el módulo de elasticidad puede determinar la tensión de rotura de la caña.

“Mas análisis sobre los datos obtenidos de las cuatro especies estudiadas indican que la longitud de las fibras tienen correlación con el módulo de elasticidad y con la resistencia a compresión aunque es muy pequeña ($r=0,03$)” (Widjaja & Risayad, 1985).

Fig. 74 Wen - Chih Wang y CaveUrban, 2013. Entrelazado irregular de la construcción Woven Sky, Australia, www.caveurban.com (20160509) Juzzo_setup_05

El módulo de elasticidad¹⁶ tiene correlación con la longitud de las fibras que forman el tejido esclerenquimatoso, que bordean los haces vasculares. Esta relación tiene valor para la utilización del bambú en construcción, para el corte en fibras que se utiliza en tejidos o por ejemplo para la industria del papel del bambú, ya que las fibras y sus características definen la rigidez de la caña de bambú (Hidalgo, 2003).

La propia geometría de la caña hace que sea un material mampuesto para uso en construcción. Por su condición física, teniendo gran longitud y una sección pequeña, además de ser una vara hueca y presentar nudos que rigidizan de forma transversal, es un elemento muy ligero que puede alcanzar gran longitud (fig. 74 y 75). “El bambú requiere solo el 57% de su masa cuando es usado como viga y solo un 40% cuando es usado como columna” (Janssen, 1988).

El bambú tiene la mayor resistencia mecánica en la dirección de sus fibras, a lo largo de su eje longitudinal, pero cuando los esfuerzos aparecen perpendiculares a la caña, a las fibras, entonces disminuye su resistencia al aparecer la disgregación de las fibras que provoca el agrietamiento de la caña. Si se realiza una comparación entre el bambú y la madera se puede indicar que este último presenta casi el doble de rigidez. Esto es debido a los ángulos en su composición, a la forma de crecimiento y a su disposición física (celulosa, fibras, célula - eje). Otro aspecto importante es la resistencia del bambú en relación al ancho de su pared transversal, donde las cañas con paredes mas finas suelen tener mejor resistencia a flexión que las de paredes anchas, esto se debe a la proporción existente entre fibras y parénquima (<https://huellasdearquitectura.wordpress.com/2015/10/14/las-propiedades-mecanicas-del-bambu/>)

“La proporción de fuerza sobre la densidad de la caña de bambú, lo que indica eficiencia de material, es 2.5 veces mayor que la madera y 3 veces del acero “(Xiao, Inoue, Paudel, 2008) (figura 73).

El estudio de modelado digital realizado en el programa de máster en

16 Módulo de elasticidad o Módulo de young: Es un parámetro que permite conocer el comportamiento de un material elástico relacionando la tensión y la deformación. Se representa por la tangente a la curva en cada punto de esa relación. El módulo de elasticidad es distinto para cada material y en el caso del bambú es distinto en cada especie.

*Fig. 75 Wen - Chih Wang. Detalles de la construcción de Light of Shodoshima , Japón, 2013.
www.caveurban.com (20190712)*

la Architectural Association (AA)¹⁷ describe:

“Las simulaciones y análisis demostraron que el bambú negocia tensiones mucho más eficientemente que las estructuras hechas por el hombre y lo hace con un mínimo de material. El bambú es una fibra extremadamente fuerte, con el doble de la resistencia a compresión del hormigón y aproximadamente la misma relación resistencia-peso de acero en tensión. Las pruebas demostraron que la configuración de cilindro hueco da un factor de resistencia de 1,9 sobre un equivalente sólido cuando se utiliza como una viga, como en una viga sólo en la parte superior (compresión) e inferior (tensión) están trabajando, el material en el centro no funciona y sólo añade peso”(Weinstock, 2006).

2.3. LA DISPOSICIÓN PROPIA DE LAS FIBRAS

2.3.1. Concepto de fibra y la disposición de las fibras del propio elemento vegetal

La Real Academia Española define “fibra” como cada uno de los filamentos que entran en composición de los tejidos orgánicos o vegetales.

Poniendo a un lado el análisis botánico y considerando el concepto de fibra como la parte mínima de un tejido, se conoce como fibra natural, desde el enfoque botánico, a las hebras susceptibles de conformar un entramado o tejido. En referencia a esta tesis, la fibra se utiliza para definir fragmentos que cuentan con escaso diámetro y gran longitud con características como la rigidez y la flexibilidad y que se obtienen a partir de los cortes de la caña de bambú.

En un elemento vegetal lo podríamos definir como las diferentes hebras que somos capaces de obtener a partir del corte de la misma, desde su conjunto hasta su parte mínima.

De cada elemento vegetal se puede obtener un tipo de fibra característico, que tendrá una sección determinada, una terminación, una longitud

¹⁷ “El programa de maestría de Emtech en la Architectural Association (AA) ha explorado el programa integrado de morfologías de las plantas, un análisis que revela nuevos modelos de estructuras de ingeniería” (Weinstock, 2006). Estudio realizado por Michael Weinstock junto con la ayuda de George Jeronimidis y Nikolaos Stathopoulos.

*Fig. 76 Vo Trong Nghia,. Café Kontum, Vietnam, 2013.
www.plataformaarquitectura.cl (20191201) foto Hiroyuki Oki*

particular, así como unas propiedades mecánicas.

La disposición de las fibras en la planta, por lo general, responde a un patrón, repetitivo e identificable y tiene que ver con las necesidades anatómicas, físicas y biológicas de ésta.

2.3.2. La disposición artificial de las fibras en la constitución de entramados

Al hablar de constitución de entramados se redefine un nuevo conjunto de fibras trabajando juntas y conformando un sistema mayor y complejo que responde a un patrón geométrico. Es lo que se podría definir como disposición artificial de fibras (figuras 74, 75 y 76).

La disposición de las fibras para conformar un tejido viene dada por las posibilidades que la fibra brinda y por las condiciones del tejido en sí. Esto genera una infinita variedad de posibilidades que a lo largo de la historia las diferentes culturas y comunidades adaptaron al utilizar las plantas que tuvieron a su alcance y los entramados que se pasaron por generaciones y que se adaptaban a sus necesidades.

El orden o disposición de las fibras viene dado por una sucesión de pasos que dan lugar al tejido final buscado. La disposición de las fibras requiere, en la construcción de superficies geométricas, donde la longitud de las fibras no alcanza para su remate, tener en cuenta el solape de fibras para dar continuidad. De esta forma se puede apreciar que al hablar de “disposición” se habla tanto de agrupar fibras como de dar prolongación (hacia los lados y hacia los extremos).

A su vez, un conjunto de fibras lleva implícito el rozamiento interno que trará y dará unión al grupo, esto dependerá de la superficie del corte de la fibra y de la geometría que se busca hacer. Una vez dispuestas en forma de entramado los nudos de entrelazado sujetarán el conjunto. Es por esto que se podría decir que los entramados conforman una nueva disposición artificial de fibras.

2.4. ESPECIES PRIORITARIAS DE BAMBÚ. CRITERIOS

INBAR

Se puede establecer un criterio, según diferentes valoraciones, donde

Bamboos

Table 1. Priority species and species of national and regional importance (Commercial and local use)

Taxa	Value			Domestication	Climate & Ecology		Genetic resources				
	C	R	I		CI	SI	GE	S	I	V	E
<i>Bambusa balcooa</i>	++	++	++	D	h, d	m, r	H	H*	H	H	H
<i>Bambusa bambos</i>	++	++	++	D	h, d, s	c, m, p	H	L	M	M	H
<i>B. blumeana</i>	++	++	++	D	h, d, s	r, m, p	H	L	H	H	H
<i>B. polymorpha</i>	+	+	-	D	h, d	r, m	H	H	M	H	H
<i>B. textilis</i>	+	++	+	D	st	r, m	M	L	H	H	L
<i>B. tuida</i>	+	++	+	D	h, d	r, m	H	M	H	H	H
<i>B. vulgaris</i>	-	-	++	D	h, d, s	r, m, p	L	L	L	L	L
<i>Cephalostachyum pergracile</i>	+	++	+	W	h, d	m	M	L	M	H	M
<i>Dendrocalamus asper</i>	++	+	++	D	h, d		H	H	M	H	H
<i>D. giganteus</i>	+	+	+	D	h	r	H	H	M	H	H
<i>D. laetiflorus</i>	++	+	+	D	h	r	M	L	M	H	L
<i>D. strictus</i>	++	+	++	D	d, s	m, p	M	L	L	H	M
<i>Gigantochloa apus</i>	+	++	++	D	h	r	H	H	M	H	H
<i>G. levis</i>	+	++	++	D	h	r	H	L	H	H	H
<i>G. pseudoarundinacea</i>	++	+	+	D	h, d		M	L	H	H	L
<i>Guadua angustifolia</i>	++	++	++	W	h	r, m	H	H	H	H	H
<i>Melocanna baccifera</i>	+	++	+	W	h		H	M	H	H	M
<i>Ochlandra</i> sps	+	+	+	W	h	r	H	H	M	H	H
<i>Phyllostachys pubescens</i>	++	++	++	D		r, m	M	M	L	L	L
<i>Thyrsostachys siamensis</i>	++	++	++	D	d, (h)	m, (r)	M	M	L	H	L

KEY Value

C = commercialization potential: High (++), medium (+), and little (-).
 Survey = need for further field survey: High (H), medium (M), low (L).
 RI = rural industries: High (++), medium (+), and little (-).
 E = environmental rehabilitation: High (++), medium (+), and little (-).

Domestication

Wild = W, domesticated = D.

Climate and ecology

CI = climate: humid tropics (h), dry tropics (d), subtropics (St), semi-arid (s), temperate (t).
 SI = soils: rich (r), medium (m), poor (p)

Genetic resources

GE = genetic erosion: High (H), medium (M), low (L).
 S = need for research on seed storage: High (H), medium (M), low (L).
 IV = need for research on in vitro storage: High (H), medium (M), low (L).
 E = need for wider exchange. High: (H), medium (M), low (L).

Fig. 77 Cuadro con la especies prioritaria de bambú de la zona Asiática, selección de 20 especies realizada por INBAR Rao, A., Ramanatha Rao, V., & Williams, J. T. (1998). Priority species of bamboo and rattan. INBAR.

se enumeren las especies que presentan una distinción particular.

2.4.1. Criterio de selección de especies

A continuación, se enumeran diferentes especies de bambú según el uso (las mayormente utilizadas para la construcción de estructuras tejidas y como elementos constructivos)¹⁸ y el tipo de haces vasculares que tiene asociado (Liese, 1998) (Londoño, 2002) (Bedell, 1997):

- Uso de bambúes para cuerda tradicional (China).

Sinocalamus affinis: III-IV

Bambusa emeiensis: III-IV

- Uso de bambúes para andamios

Bambusa pervariabilis: III-IV

Bambusa Tuldoides Munro: III-IV

Phyllostachys Pubescens: I

- Uso de bambúes para gaviones

Gigantochloa atter: III-IV (fig. 81)

Gigantochloa verticillata: III-IV

Dendrocalamus Hamiltonii: III-IV

Dendrocalamus asper: III-IV

Bambusa pallida: III-IV

- Uso de bambú para construcción – arquitectura

Guadua angustifolia Kunth: II y IIa (fig. 82)

Bambusa vulgaris: III-IV

Dendrocalamus strictus: III-IV

Bambusa tulda: III-IV

Bambusa multiplex: III-IV

Dendrocalamus asper: III-IV

Dendrocalamus hamiltonii: III-IV

- Tejidos de cestería y arquitectura

¹⁸ Bambúes utilizados para: conformar cuerdas y cables, como elemento constructivo, para realizar gaviones, para andamios, para laminados y paneles.

Fig. 78 *Bambusa nutans*
Hand book on bamboo. National Bamboo Mission (2008), India

Fig. 79 *Dendrocalamus giganteus*
Hand book on bamboo. National Bamboo Mission (2008), India

Phyllostachys nigra: I

Phyllostachys heterocloda: I

Phyllostachys meyeri: I

Phyllostachys violascens: I

Phyllostachys edulis: I

Phyllostachys bambusoides: I

Phyllostachys distegia: I

Bambusa emeiensis: III-IV

Guadua angustifolia: II

- Publicación de INBAR: Priority species of bamboo and rattan. Selección de 20 especies (figura 77).

Uno de los criterios de selección se basa en la publicación de investigación realizada por INBAR y IPGRI en 1998 titulada: "Priority species of bamboo and rattan". La selección de bambú de Asia que aquí se describe está relacionada a una lista en base a un estudio realizado con la asistencia de expertos en campo, taxonomía, selvicultura, genética, conservación, agro- ecología, etc. Se conocían hasta el momento de la investigación 75 géneros y 1250 especies de bambú, aproximadamente el 75% de las especies se usan localmente para muchos propósitos, y unas 50 especies se utilizan extensivamente.

El criterio de selección de INBAR y IPGRI fue el siguiente:

- Utilización
 - a. Importancia en los países en referencia al uso corriente
 - b. Importancia en las regiones en referencia al uso corriente
 - c. Potencial importancia para la expansión de uso en países
 - d. Potencial importancia para la expansión de usos en regiones
- Cultivos
 - a. Grado de conocimiento con respecto a domesticación y comercialización.
 - b. Idóneo para uso en circunstancias especiales (laderas degradadas, áreas montañosas, etc.)

Se reconocieron de este modo las especies de mayor prioridad para áreas regionales e internacionales (no se incluyeron las especies utilizadas sólo localmente o de programas nacionales).

Fig. 80 *Oxytenanthera parvifolia*
Hand book on bamboo. National Bamboo Mission (2008), India

Fig. 81 *Gigantochoa atter*
Fig. 82 *Guadua angustifolia*
www.commonswikimedia.org (20170822)

La siguiente es la lista de 20 bambúes acordando la prioridad para la acción internacional basada en los criterios anteriores descritos:

- *Bambusa balcooa* Roxb.
- *B. bambos* (L.) Voss
- *B. blumeana* J A and J H Schultes
- *B. polymorpha* Munro
- *B. textilis* McClure
- *B. tulda* Roxb.
- *B. vulgar-is* Schrad. ex Wendl
- *Cephalostachyum pergracile* Munro
- *Dendrocalamus asper* (Schultes f.) Backer ex Heyne
- *D.giganteus* Wallich ex Munro (fig. 79)
- *D.latiflorus* Munro
- *D. strictus* (Roxb.) Nees
- *Gigantochloa apus* J A and J.H. Schultes
- *G. levis* (Blanco) Merrill
- *G.pseudoarundinacea* (Steud.) Widjaja
- *Guadua angustifolia* Kunth (fig. 82)
- *Melocanna baccifera* (Roxb.) Kurz
- *Ochlandra* Thw. (Spp.)
- *Phyllostachys pubescens* Maze1 ex H. de Leh l1 including *P. bambusoides* Sieb. and Zucc and *P. edulis* Makino
- *Thyrsostachys siamensis* (Kurz) Gamble

En base a la selección de especies a continuación se enumera la información mas destacada de los Géneros:

1. *Arundinaria*

Género de pequeños a medianos bambúes resistentes, se distingue por tener en cada nudo de la caña numerosas ramas. Es originaria de Estados Unidos (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018).

Rizoma: Leptomorfo / Monopodial

Fig.83 Diferentes especies de bambú del género *Phyllostachys*

1. *Phyllostachys aurea*
2. *Chimonobambusa quadranguris*
3. *Phyllostachys nigra*
4. *Phyllostachys bambusoides* "Violascens"
5. *Phyllostachys nigra* f. *boryana*
6. *Phyllostachys viridis*
7. *Phyllostachys bambusoides*

Recht, C., & others. (2015). *Bamboos*. Pavilion Books.

Arundinaria	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
Arundinaria funghomii	9,1	2,8	-18
Arundinaria gigantea	6,1	2,5	-23
Arundinaria gigantea "Macon"	6,1	2,5	-30

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No.

36, 2017-2018) Selección de especies.

2. Bambusa

Bambúes tropicales y subtropicales. Tienen varias ramificaciones en los nudos, de las cuales algunas son mas largas que el resto (figura 78). (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018).

Utilidades: tejidos, andamios, construcción, gaviones

- Rizoma: Paquimorfo / Simpodial

Tipo de haces vasculares: III –IV (Bedell, 1997)

Bambusa	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
Bambusa vulgaris	15,2	10,2	-1
Bambusa vulgaris "Vittata"	15,2	10,2	-1
Bambusa tulda	21,3	10,2	-1
Bambusa textilis	12,2	5,1	-8
Bambusa nutans	12,2	7,6	-2
Bambusa multiplex	7,6	3,8	-8

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No.

36, 2017-2018) Selección de especies.

3. Dendrocalamus

Es un género de bambú tropical, gigante, con hojas grandes. Es un bambú similar al género Bambusa (figura 79) (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018).

Utilidades: tejidos, gaviones, construcción

Rizoma: Paquimorfo / Simpodial

Tipo de haces vasculares: III –IV (Bedell, 1997)

Dendrocalamus	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
Dendrocalamus asper	30,5	20,3	0
Dendrocalamus giganteus	30,5	30,5	-4
Dendrocalamus hamiltonii	24,4	17,8	-3
Dendrocalamus strictus	18,3	12,7	-1
Dendrocalamus validus	14	10,2	-4

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No.

36, 2017-2018) Selección de especies.

4. Gigantochoa

Fig. 84 Wen - Chih Wang y Caveurban. Construcción Woven Sky, Australia, 2013.
Bambú Moso (*Phyllostachys edulis*) y bammbú madake (*Phyllostachys bambusoides*)
www.caveurban.com (20170325)

Fig. 85 Wen - Chih Wang y Caveurban. Construcción Woven Sky, Australia, 2013.
Bambú Moso (*Phyllostachys edulis*) y bammbú madake (*Phyllostachys bambusoides*)
www.caveurban.com (20170325)

Género de bambú gigante (figura 81) (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018).

Utilidades: Andamios y gaviones

Rizoma: Paquimorfo / Simpodial

Tipo de haces vasculares: III–IV (Bedell, 1997)

Gigantochloa	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
Gigantochloa apus	19,8	10,2	5
Gigantochloa atter	15,2	10,2	-2
Gigantochloa levis	13,7	12,7	-2
Gigantochloa robusta	18,3	8,9	-2

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018) Selección de especies.

5. Guadua

Es un género de bambú tropical, que crece gigante (figura 82) (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018).

Utilidades: Construcción, laminados.

Rizoma: Paquimorfo / Simpodial

Tipo de haces vasculares: II –IIa (Bedell, 1997)

Guadua	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
Guadua angustifolia	30,5	20,3	-1
Guadua amplexifolia	15,2	10,2	-2
Guadua velutina	15,2	10,2	-2

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018) Selección de especies.

6. Oxytenanthera

Género tropical que crece principalmente en África (figura 80) (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018).

Rizoma: Paquimorfo / Simpodial

Tipo de haces vasculares: III (Bedell, 1997)

Oxytenanthera	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
Oxytenanthera abyssinica	9,1	10,2	-1
Oxytenanthera braunii	9,1	10,2	-1

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018) Selección de especies.

Fig. 86 Vo Trong Nghia, Architects. Bar de playa Naman Retreat, Vietnam, 2015.
www.plataformaarquitectura.cl (20191201) foto Hiroyuki Oki

7. *Phyllostachys*

Bambúes medianos a grandes. Se los distingue fácilmente porque tienen un surco sobre los nudos (figura 83,84 y 85) (American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018)

Utilidades: Tejidos, laminados, andamios

Rizoma: Leptomorfo / Monopodial

<i>Phyllostachys</i>	máx. longitud (m)	máx. diámetro (cm)	min. Temperatura
<i>Phyllostachys aurea</i>	8,2	4,6	-15
<i>Phyllostachys bambusoides</i>	21,9	15,2	-15
<i>Ph. bambusoides</i> "albovariegata"	7,6	4,5	-15
<i>Ph. bambusoides</i> castillon	10,7	5,1	-15
<i>Phyllostachys edulis</i>	22,9	17,8	-15
<i>Phyllostachys nigra</i>	9,1	5,1	-15

(cuadro re hecho del documento: American Bamboo Society, Bamboo Species Source List No. 36, 2017-2018) Selección de especies.

2.4.2. Características de la *Guadua angustifolia* Kunth

“Las plantas son estructuras jerárquicas, de materiales con propiedades sutiles que son capaces de ser cambiados por la planta en respuesta a las tensiones locales o globales” (Weinstock, 2006) (fig. 86)

La *Guadua angustifolia* Kunth, es la especie mas utilizada actualmente para construcción y de gran interés en arquitectura por las condiciones anatómicas que se adaptan a las necesidades de resistencia mecánica.

Las características específicas de la *Guadua angustifolia* kunth (1822) son:

Sinonimia, selección de 49 sinónimos mas utilizados (www.tropicos.org):

Arundarbor guadua (Bonpl.) Kuntze

Bambusa guadua Humb. & Bonpl.

Bambusa guadua subesp. *guadua*

Guadua aculeata Rupr. ex E.Fourn.

Nastus guadua (Bonpl.) Spreng.

Características taxonómicas (Londoño, 2002):

Nombre común: Guadua

Nombre científico: *Guadua angustifolia* Kunth

Fig. 87 Distribución de la *Guadua* en América Latina
Bystriakova, N., Kapos, V., & Lysenko, I. (2004). *Bamboo biodiversity: Africa, Madagascar and the Americas* (No. 19). UNEP/Earthprint.

Familia: Poaceae Barnhart

Género: *Guadua*

Subtribu: Guaduinae

Ubicación (fig. 87), Altura sobre el nivel del mar máx: 2800 msnm

Formas: *Guadua castilla*, *Macana* y *cebolla*

Variedades: Bicolor, Negra

De acuerdo con el Centro Nacional para el Estudio del Bambú *Guadua* (www.crq.gov.co), este Género se divide en cinco partes, las cuales se describen a continuación:

- “Rizoma: Tallo modificado, subterráneo, que conforma el soporte de la planta. Es un lugar por donde la *guadua* absorbe los nutrientes. Se ha utilizado en estabilización de laderas y prevención de erosión.
- Cepa: La parte del culmo con mayor diámetro y espesor de pared. Posee longitud de 4 metros. Las distancias de entrenudos son las mas cortas y en construcción se utilizan como columnas.
- Basa: El diámetro es intermedio y la distancia entre nudos es mayor que en la cepa, es la parte que mas se utiliza. Tiene 11 metros.
- Sobrebasa: El diámetro es menor y la distancia entre nudos es un poco mayor comparando con la basa. La longitud es aproximadamente de cuatro metros.
- Copa: es la parte apical de la *Guadua*, con una longitud entre 1,20 a 2 metros.”

Anatómicamente el culmo está constituido por un 40% de fibra, 51% de parénquima, 9% de tejido conductivo (Londoño, 2002).

Londoño, Camayo, Riaño & López (2003) indican que el “porcentaje de fibra fluctúa entre 64.8% y 97.2% por haz vascular, observándose mayor porcentaje en los haces vasculares de las zonas de periferia y transición (89.9%-97.2%) que en los haces vasculares de las zonas media e interna (64.8%-87.2%) y el menor porcentaje de fibra se registró en la zona interna (64.8%). “

Se observa gran cantidad de sílice en la cara externa de la *Guadua angustifolia*, lo que hace que sea un bambú con gran resistencia y dureza (Londoño, Camayo, Riaño & López, 2003).

Fig. 88 Tanabe Chikuunsai IV. Instalación de tejidos con bambú, pieza titulada *The Gate*, Metropolitan Museum of Art, 2017. [www.journal-du-design.fr\(20191130\)](http://www.journal-du-design.fr(20191130))

Grosser & Liese (1971) observaron que los haces vasculares son de mayor tamaño en la cara interior en los bambúes de la especie *Guadua angustifolia*, lo cual es diferente a la mayoría de los bambúes que presentan el mayor tamaño de haces vasculares es en medio de las paredes de la caña. Londoño, Camayo, Riaño & López (2003) indican que la *Guadua angustifolia* tiene una zona de periferia con haces vasculares muy pequeños pegados a la cara externa y la corteza de la caña que deja poco espacio para la presencia de parénquima y mide 0.65 - 0.77 mm de longitud con una relación radio/tangente de 1.15 a 1.6. También indican que en el análisis anatómico de la *Guadua angustifolia* se pueden observar distintas zonas como la cara externa que alcanza el 4.5% del espesor de la pared del culmo, la primera zona media que corresponde al 10.7% del espesor de la pared que mide 1.2 - 2.55 mm con haces vasculares de forma ovoide, con variedad de tipos, y vainas de esclerénquima con una relación radio/tangente de 1.5 a 2.7 y un diámetro del metaxilema de 0.07 mm. La segunda zona media corresponde al 73.9% del espesor de la pared del culmo es la mas ancha de todas, mide 4.9 - 16.34 mm de longitud, con haces vasculares de forma circular que permiten identificar la especie de bambú por sus características particulares que tienen una relación radio/tangente de 0.98 a 1.73 y un diámetro de metaxilema de 0.15 mm. Por último la zona de la cara interior corresponde al 10.8% del espesor de la pared que mide 1.3 - 2.0 mm de longitud, presentan forma ovalada a circular, con una relación radio/tangente menor de 1 (0.62 - 0.94) (Londoño, Camayo, Riaño & López, 2003).

Tipo de haces vasculares: II Y Ila (Londoño, Camayo, Riaño & López, 2003). Mediante la observación y el estudio de los tipos de haces vasculares, Liese (1998) & Grosser (2000) identificaron un subtipo Ila que fue incorporado en las investigaciones por Sekar & Balasubramanian (1994). Se diferencian del tipo II al presentar una vaina de esclerénquima en uno de los lados y mas capas de células de parénquima (Londoño, Camayo, Riaño & López, 2003).

Fig. 89. Cortes de latillas o tiras de bambú de diferentes tamaños.
X-Bamboo design project: 2014-2015 UCL, Bartlett AD, Wonderlab RC5 Team members: Zhenhua Luo, Jianhua Ren, Junwei Ren, Longfei Wang, Lina Lan.

CAPÍTULO 3 LOS CORTES EN FIBRAS DEL BAMBÚ

3.1. LOS CORTES DEL BAMBÚ

Las cañas de bambú son estructuras largas y finas, y el hueco de los entrenudos las hace comparativamente más ligeras que otros materiales. La resistencia mecánica del bambú varía hasta que alcanza la madurez, según la especie, la edad de la caña, la humedad relativa y la porción de la caña que se utiliza.

Ranjan, Iyer, & Pandya (1986) indican que las estructuras de acero tienen una resistencia a la tracción de $1,375 \text{ kg/cm}^2$, que en comparación con la especie *Phyllostachys bambusoides* que tiene una resistencia a la tracción de $2,629 \text{ kg/cm}^2$ es capaz de superar su comportamiento mecánico (Ranjan, Iyer, & Pandya, 1986).

La geometría natural de la caña de bambú permite obtener una serie de cortes (fig. 89) que dan opción a diferentes modos de uso (fig. 88) y esto ofrece diferencias en la resistencia del material también.

Según la franja de pared¹ de la caña que se seleccione para trabajar ofrecerá una resistencia mecánica particular, esto se debe a su condición anatómica que se define por los haces vasculares y el parénquima de cada especie (Obataya, Kitin, & Yamauchi, 2007). Es por esto que los cortes conforman una de las variables que determinan las posibilidades finales de la construcción con fibras de bambú.

3. 1.1. Tipologías de corte del bambú

Se diferencian dos tipos de corte según la dirección de la caña:

a) Sección longitudinal a la caña:

Las tres partes de la caña, desde su base hasta la copa, se denominan comunmente: cepa, medio o basa y apical o ápice (figura 90 y 92). Los cuales tienen utilidades concretas vinculadas a su anatomía y su constitución física.

¹ Se denomina pared de la caña al grosor que tiene la planta al realizar un corte transversal a su eje principal. La mayor parte de las especies de bambú se caracterizan por tener un centro ahuecado, al realizar un corte se observa dicho ancho de pared.

Fig. 90 Representación de las partes que se pueden identificar en la vertical del bambú. Elaboración propia

Fig. 91 Representación gráfica de los cortes radiales de dos cañas de bambú de diferente dimensión
Elaboración propia.

La cepa presenta entrenudos más cercanos, paredes más anchas y mayor diámetro de la sección general de la caña. En cuanto a su composición anatómica presenta mayor porcentaje de parénquima que de fibras, esta sección tiene mayor resistencia a compresión, aunque en comparación a los otros cortes, es la parte que presenta menor resistencia mecánica (Hidalgo, 2003). Por sus características físico-anatómicas, la basa se utiliza en gran medida para la formación de pilares de construcción.

La parte media o central es la mas resistente a tracción, la distancia entrenudos es mayor que en la cepa, lo que va incrementando la resistencia a flexión. Las paredes son mas finas que en la cepa (Hidalgo,2003). Se utiliza comúnmente como viguetas, andamios, esterillas, vigas, etc.

La parte alta o apical, es la mas resistente a compresión y a flexión. Con largos entrenudos y paredes mas finas.

Se utiliza para la configuración de correas en cubiertas o para guía en agricultura.

Fig. 92 Partes del bambú.
Hidalgo, O. L. (1978). *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Estudios Técnicos Colombianos.

b) Sección transversal de la caña:

Los cortes para obtención de fibras tiras o latillas² (fig. 91) se pueden dividir según la dirección: radial (fig. 93 y 94) o tangencial (figuras 98 y 99) a la caña. De manera global se pueden identificar las siguientes tipologías:

b. 1) Cortes radiales o centrífugos:

- 1/2 caña
- 1/4 caña
- 1/8 caña
- 1/16 caña ...

Utilizados para cestería mayormente:

- 1/64 caña
- 1/128 caña ...

Al realizar cortes radiales (fig. 93 y 94) se obtienen tiras o fibras que integran todas las caras de la caña. Estos cortes presentan altos índices de sílice y fibras que se encuentran en su cara externa, además de gran cantidad de parénquima presente en la cara interna. Se obtienen cortes

Fig. 93 Corte radial de la caña de bambú
Rajan M.P., Iyer N. & Pandya Ghanshyam, (2004). *Bamboo and Cane Crafts of Northeast India*. India: National Institute of Design Editor.

Fig. 94 Representación de cortes radiales del bambú
Elaboración propia.

² Se conocen comúnmente como "latillas" los cortes en tiras del bambú.

Fig. 95 Demostración del proceso de corte para obtener fibras de bambú para la realización de cestería en Japón.

Rinne, M. M., & Okada, K. (2008). *Masters of Bamboo: Artistic Lineages in the Lloyd Cotsen Japanese Basket Collection*: [exhibition, San Francisco, Asian Art Museum, Feb. 2-May 6, 2007]. Asian Art Museum.

de bambú que resisten bien a flexión, ya que las fibras trabajan bien a tracción y el parénquima absorbe la compresión.

b. 2) Cortes transversales:

- Cara exterior
- Cara media
- Cara interior

Los cortes transversales (figuras 96 y 97) seccionan las caras de la caña, como en cualquiera de los tipos de cortes, existe la variante de la especie de bambú que vendrá determinada por un diámetro de caña y un espesor de pared, lo que permitirá mas o menos cortes radiales. En algunos casos se pueden obtener latillas de la cara interior, cara exterior y hasta caras intermedias (figura 98), pero algunas especies con finas paredes solo admiten un corte radial.

La cara externa es la de mayor resistencia y la que almacena menos agua. Con mayor densidad de fibras, debe ser fuerte ya que se encuentra en contacto con el ambiente y protege la planta.

La parte intermedia es una capa de transición entre caras.

La cara interior es la que presenta mayor porcentaje de parénquima y es más susceptible a ataques de insectos, por ser la cara más blanda.

Cortes en fibras del bambú para trabajos en cestería_ Proceso

Como demostración pública del proceso de trabajo con bambú para la realización de un tejido tradicional de Japón se realizó una exhibición en el Asian Art Museum en 2006 (figura 95). El bambú con el que se trabajó fue *Phyllostachys bambusoides* (Madake) de un diámetro aproximado de 5 cm. Esta especie es la más utilizada en Japón para la ejecución de entramados de bambú (alrededor del 80%). La caña era de 3 años de edad y fue tratada previamente mediante un proceso de limpieza de agua y lejía y luego secada al sol por un mes (Rinne & Okada, 2008).

Rinne & Okada (2008) describen el proceso de trabajo realizado a continuación:

“Se limpia la cara exterior eliminando las protuberancias cercanas a los nudos, se quita además la piel fina exterior con un cuchillo.

Fig. 96 Corte transversal de la caña de bambú
Ranjan, M., Iyer, N., & Pandya, G. (1986). *Bamboo and cane crafts of Northeast India*. Development Commissioner of Handicrafts, Govt. of India.

Fig. 97 Representación de cortes transversales donde se obtienen diferentes caras del ancho de pared del bambú.
Elaboración propia

Fig. 98 Caras del bambú
Saraz, O., Alexander, J., Vélez Restrepo, J. M., Velásquez, C., & José, H. (2007). *Determination of poisson of the ratio Guadua angustifolia Kunth using image processing and its relationship with the microstructure*. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, 60(2), 4067–4076.

Ensaio	Dimensões (cm)	Adesivo	Tratamento	Resistência (MPa)
Compressão	2,0 x 3,0 x 5,0	Resorcinol	Água	37,14
			Químico	34,29
		Ureia	Água	33,87
			Químico	35,08
Módulo de elasticidade à compressão	4,0 x 4,0 x 16,0	Resorcinol	Químico	73,65
			Químico	11415
Flexão	2,5 x 3,0 x 30,0	Resorcinol	Água	≈ 57,90
			Químico	≈ 50,20
		Ureia	Água	≈ 68,50
			Químico	72,57
Cisalhamento paralelo às fibras	4,0 x 4,0 x 4,0	Resorcinol	Químico	20,00
Cisalhamento na linha de colagem	5,0 x 2,5 x 3,0	Resorcinol	Água	25,76
			Químico	24,25
		Ureia	Água	≈ 23,00
			Químico	≈ 21,00

Fig. 99 Processo de corte de uma caña de bambú para la obtención de laminados horizontales, verticales y mixtos
Xiao, Y., Inoue, M., & Paudel, S. K. (2008). *Modern Bamboo Structures: Proceedings of the First International Conference*. CRC Press.

Fig. 100 Resistencia mecánica de laminados de bambú según el adhesivo utilizado
Lima, D. M. de. (2013). *Bambu laminado colado (Dendrocalamus giganteus) aplicado à treliça plana tipo Howe e à viga retangular*.

La caña se corta en dos mitades con el cuchillo y luego se vuelven a cortar las mitades obteniendo 4 tiras. Una vez conseguidas las tiras se quitan los nudos interiores.

Cada 1/4 se vuelven a cortar obteniendo 1/8 y luego 1/16 tiras finas. La cara exterior del bambú se separa de la interior cortándola con el cuchillo. Se utilizará la cara exterior para realizar el entramado³.

Se utiliza una herramienta en forma de V para que todas las finas tiras tengan el mismo ancho.”

El resultado son 34 tiras finas de 55 a 60 cm de longitud, 2 mm de espesor y 0,5 a 0,7 mm de ancho. Además 40 finas tiras de 2,8 m de largo, 0,9 mm de espesor y 0,5 a 0,7 mm.

3.2. TIPOLOGÍAS DE CORTE SEGÚN LOS USOS

3.2.1. Cortes realizados para laminados

“Es importante resaltar que gran parte de los nuevos materiales, compuestos o no, derivan de perfeccionamientos y re combinaciones de materiales utilizados tradicionalmente en la construcción.” (Azpilicueta, 1994)

a) Tableros laminados de bambú (Laminated Bamboo Lamber, LBL)

Los tableros laminados permiten generar nuevas asociaciones de cortes de la caña de bambú que trabajan de forma solidaria (figura 99) (Xiao, Inoue, & Paudel, 2008).

Las especies de bambú ofrecen la posibilidad de realizar diferentes trabajos de manufactura e industriales ya que varían los grosores de pared y sus dimensiones. Actualmente se pueden realizar productos específicos conociendo las especies con las que se trabaja. El desarrollo de LBL está creciendo principalmente en países como India, Vietnam o China, donde existen bosques de bambú de donde se obtiene el material y donde culturalmente está muy arraigado el trabajo y la manipulación de esta planta (Xiao, Inoue, & Paudel, 2008).

Según indican Mahdavi, Clouston, & Arwade (2010) existen dos

³ Las fibras de la cara exterior permiten que los cortes tengan la flexibilidad necesaria para realizar curvaturas poco distanciadas presentes en los nudos de entramado de patrones de entrelazado a pequeña escala como son los trabajos en cestería.

Ensaio	Dimensões (cm)	Adesivo	Posição da lâmina	Resistência (MPa)
Compressão	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	58,77
			Interna	54,22
		adespec	Externa	64,42
			Interna	62,00
Flexão	8,0 x 1,5 x 40,0	PVA	Externa	78,95
			Interna	91,20
		adespec	Externa	75,60
			Interna	67,85
Módulo de elasticidade na flexão estática	8,0 x 1,5 x 40,0	PVA	Externa	11913,88
			Interna	10555,70
		adespec	Externa	7965,22
			Interna	7790,25
Cisalhamento radial (área cisalhada: 1,5 x 3,0)	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	11,18
			Interna	9,42
		adespec	Externa	9,84
			Interna	11,87
Cisalhamento longitudinal tangencial na fibra (área cisalhada: 8,0 x 3,0)	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	6,45
			Interna	7,34
		adespec	Externa	7,69
			Interna	7,79
Cisalhamento longitudinal tangencial na lâmina de cola radial (área cisalhada: 8,0 x 3,0)	8,0 x 1,5 x 4,0	PVA	Externa	2,35
			Interna	3,29
		adespec	Externa	2,07
			Interna	1,40

Fig. 101 Resistencia mecánica de laminados de bambú según la cara del bambú utilizada y el adhesivo
Lima, D. M. de. (2013). Bambu laminado colado (*Dendrocalamus giganteus*) aplicado à treliça plana tipo Howe e à viga retangular.

patentes de bambú laminado, la primera por Chu conocida como “Bamboo board” (U.S. Patent N° 4.810.551, 1989) y la segunda por Plaehn que lleva el nombre “Parallel randomly stacked, stranded, laminated bamboo boards and beams” (U.S. Patent N° 5.543.197).

El proceso de fabricación es sistemático, aunque existen varios métodos, en general los pasos se repiten y el resultado que se obtiene es el mismo.

Lo primero es la selección de la especie de bambú con la que se va a trabajar, ya que se necesitan paredes gruesas para conseguir latillas o fibras anchas y fuertes. Se elimina la cara externa ya que la latilla debe ser rectangular para poder armar el laminado y además se requiere mas absorción de adhesivo por lo que no es óptimo contar con el sílice y la capa cerosa externa. La cara interior también se extrae. La dimensión de las latillas obtenidas dependerá finalmente de la especie de bambú utilizada. Lo habitual es trabajar con piezas rectangulares de 3 x 1 cm (fig. 99) (Xiao, Inoue, & Paudel, 2008).

El bambú tiene una curvatura natural, es por ello que las latillas obtenidas de la caña no serán rectas y necesitarán vapor de agua para moldearlas. Así se obtienen latillas rectas que se pueden agrupar y pegar entre ellas. Para continuar trabajando se deja secar, muchas veces se utiliza una máquina de secado para reducir los tiempos.

Se aplica el adhesivo y se coloca en la máquina de prensado y luego se hace el aparejo lateral y longitudinal, se realiza el corte de láminas (fig. 100).

El acabado se da con una imprimación de barniz de poro abierto para que no reseque las fibras del bambú.

El resultado mecánico de estos tableros fue analizado en distintas ocasiones y con diferentes especies de bambú y condiciones de humedad.

En la tabla de la figura 101 se exponen los resultados de la experimentación con *Dendrocalamus giganteus* por Beraldo y Rivero (2003) y extraído del texto de Lima (2013). Muestra además una comparativa de resultados dependiendo del tipo de adhesivo.

Cuando se trabaja con un bambú de anchas paredes donde se puede obtener de un espesor dos latillas, una mas cercana a la cara exterior y otra a la interior, entonces el laminado resultante variará sus características de resistencia mecánica en base a la utilización de unas latillas u otras, o la combinación de ambas.

Fig. 103. Influencia de la variación de temperatura en el esfuerzo de tracción y módulo de deformación de los tableros cuando la presión es constante

Mora Rodriguez, L., Hernández González, J. R., Martirena Hernández, J. R., & Jiménez, S. A. (2008). El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica. *Revista ingeniería de construcción*, 23(3), 179–186.

b) Tableros tejidos prensados de bambú (TBP)

Los tableros laminados pueden fabricarse también a partir de la superposición de tejidos planos de fibras de bambú (fig. 102).

Mediante sierras mecánicas o sierra de estrella se realizan cortes en la caña hasta obtener latillas finas de 2 mm de espesor y 2 o 3 cm de ancho, con ellas se realiza un tejido (ortogonal o diagonal). Una vez hechas se superponen los entrelazados como si fueran capas de material y se coloca el adhesivo con rodillo o pincel sobre ellos (Mora Rodríguez, Hernández González, Martirena Hernández, & Jiménez, 2008).

El siguiente paso es el prensado, que dependiendo del adhesivo que se utilice y la resistencia de este a las temperaturas podrá ser prensa fría o caliente. Las características de la prensa darán un resultado particular ya que la presión puede ser variable.

Los cuadros (fig. 103) son el resultado de la experimentación de Mora Rodríguez, Hernández González, Martirena Hernández y Jiménez (2008) realizada con tableros tejidos prensados de *Bambusa vulgaris* Schrab de una capa sometidos a tracción con una prensa Instron Modelo: 5582. Para esta propuesta se utiliza como aglomerante el compuesto Poli-Vinil Acetato (PVA) conocido comúnmente como cola blanca. Este adhesivo tiene alta resistencia dejando uniones rígidas como resultado, además no contiene solventes que puedan dañar el material natural y resiste más de 80°C (Mora Rodríguez, Hernández González, Martirena Hernández, & Jiménez, 2008).

“Es recomendable trabajar con presiones de prensado de 2MPa a 4MPa y temperaturas de prensado en el intervalo de 80°C a 100°C para TBP de una capa “ (Mora Rodríguez, Hernández González, Martirena Hernández, & Jiménez, 2008).

3.2.2. Cortes realizados para formar cuerdas de bambú

Las cuerdas de bambú tienen gran tradición en Asia y su uso fue principalmente desarrollado para la náutica y la ingeniería civil⁴ (fig. 104).

Las cuerdas son entramados complejos que requieren superposición

Fig. 102 Tejidos para la formación de esteras de bambú con lo que se realizan luego tableros prensados.

Mora Rodríguez, L., Hernández González, J. R., Martirena Hernández, J. R., & Jiménez, S. A. (2008). El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica. *Revista ingeniería de construcción*, 23(3), 179–186.

Fig. 104 Imagen de cuerdas de bambú realizadas en India
Ranjan, M., Iyer, N., & Pandya, G. (1986). *Bamboo and cane crafts of Northeast India*. Development Commissioner of Handicrafts, Govt. of India.

⁴ “Los cables de bambú de los puentes suspendidos se fabrican de la misma manera que los utilizados para remolque de barcos contra la corriente de los ríos, pero de mayores dimensiones” (Needham, Wang, & Lu, 1971)

Fig. 106 Herramientas industriales y proceso para la construcción de cestería, esterillas, etc.
Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Lopez.

de capas y en las cuales el rozamiento es un factor importante el cual aumenta al entrar en tensión la cuerda. Se puede hablar de dos capas principales: la externa de la cuerda y la interna o el corazón del tejido de la cuerda.

Existen varios métodos para conformar una cuerda de bambú y cada cultura cuenta con una forma particular dependiendo de la especie de bambú a la que tienen acceso. Aun así, la especie que mejor responderá a este uso será la que mayor porcentaje de fibras y mayor longitud de fibras tenga. Por otro lado, en cuanto a la conformación de las cuerdas, responderán mejor aquellas que utilicen las fibras de la cara externa de la caña y las dispongan en el entramado en la zona exterior. Estas fibras son mas resistentes a la fricción, al agua y a la vez son mas flexibles, protegen el interior de posibles agentes patógenos. Todo ello se relaciona nuevamente a la condición anatómica del bambú (Hidalgo, 2003) (Ranjan, Iyer & Pandya, 1986).

El tejido interior de la cuerda, precisa mayor contenido de parénquima, ya que esta actúa como esponja o soporte de las fibras externas de la cuerda y una vez que la cuerda entra en tensión es capaz de amoldarse y aumentar el rozamiento interno.

3.2.3. Cortes realizados para formar gaviones

Para la construcción de gaviones se utiliza la caña entera de bambú, sobre todo la cara externa ya que los gaviones están expuestos a mucha fricción y rozamiento, además de la erosión y el desgaste del contacto con el agua y las piedras (fig. 105).

Existen varias técnicas para realizarlos, lo que se requiere en cualquier caso son cortes a lo largo de la caña para obtener tiras con las que realizar el trenzado (entre 8 y 12 tiras). Los bambúes con mayor longitud de fibras ofrecen mas facilidad para realizar cortes longitudinales, además se buscan diámetros de entre 5 – 7 cm con paredes no muy gruesas para que la gravedad específica sea mayor y el contenido de parénquima menor (Ingemar Saevfors) (Hidalgo, 2003).

Para los cortes se utilizan herramientas manuales habitualmente como machetes, cuchillos o sierra en estrella (Hidalgo, 2003).

Fig. 105 Gaviones de bambú
Hidalgo, O. L (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Lopez.

Fig. 107 Cortes de bambú con máquina industrial de estrella (SSM)
Ramos, B. P. F. (2014). Metodologia de curvatura de bambu laminado colado (BLAC) para fabricação de mobiliário: diretrizes para o design.

Fig. 108 Máquina industrial de corte de latillas (SSM)
www.youtube.com/watch?v=2qVm82Eruak
X-Bamboo design project: 2014-2015 UCL, Bartlett AD, Wonderlab RC5 Team members: Zhenhua Luo, Jianhua Ren, Junwei Ren, Longfei Wang, Lina Lan.

3.3. OBTENCIÓN DE FIBRAS Y MANIPULACIÓN DE LAS FIBRAS

3.3.1. Evolución de las herramientas y maquinaria para la realización de cortes

A lo largo de la historia se puede apreciar la evolución de las herramientas para la realización de cortes al bambú y la aparición de maquinarias con la búsqueda de industrializar este material (fig. 106). Lo que se mantiene constante son las tipologías de cortes⁵.

McClure (1953) enumera las herramientas tradicionales de uso manual: Machete, de estrella, hacha, sierra de madera, serrucho, taladro, cincel, cuchillos de corte, etc.

Las herramientas de uso industrial (fig. 107):

Hidalgo (2003) enumera la maquinaria para procesar el bambú, que se describe textual a continuación, para la obtención de:

- Cestería

- Con la cuchilla de estrella manual (fig. 109) o con la máquina de corte (fig. 107), que remueve los nudos interiores llamada shaving and sizing machine.
- Máquina de corte industrial (slicing machine) (fig. 108)
- Máquina de tejido (bamboo basket bottom making machine), se obtiene un tejido plano
- Máquina para afilar los extremos de las tiras obtenidas / máquina para lijar
- Trabajo manual para darle la curvatura y la forma a la cesta.

- Tejidos planos

- Con la sierra de estrella manual o con la máquina de corte, que remueve los nudos interiores llamada shaving and sizing machine.
- Máquina de corte (slicing machine)
- Máquina láser de esterillas de bambú (bamboo mat lacer)

Fig. 109 Herramienta manual de estrella para corte en tiras o latillas de bambú

Xiaobing, Y. (2007). *Bamboo: Structure and Culture: Utilizing Bamboo in the Industrial Context with Reference to Its Structural and Cultural Dimensions*. Doctoral Dissertation, Fachbereich Kunst und Design der Universität Duisburg.

⁵ Desde el principio de los tiempos fue posible manipular el bambú de forma simple con las herramientas disponibles. Con un machete se pueden realizar cortes en tiras si se golpea en la dirección de las fibras, de forma longitudinal.

*Fig. 109 Máquina de control numérico para corte de latillas de bambú
X-Bamboo design project: 2014-2015 UCL, Bartlett AD, Wonderlab RC5 Team
members: Zhenhua Luo, Jianhua Ren, Junwei Ren, Longfei Wang, Lina Lan.*

- *Finas fibras*

- a. Máquina de corte a lo largo (cross cutting machine)
- b. Máquina para remover los nudos exteriores de la caña (outer knot removing machine)
- c. Máquina de corte, que remueve los nudos interiores llamada shaving and sizing machine.
- d. Máquina de corte industrial (slicing machine) (fig.108)
- e. Máquina cortadora de palos finos (joss stick splitter)

- *Pinchos / palillos*

- a. Máquina de corte, que remueve los nudos interiores llamada shaving and sizing machine.
- b. Máquina de corte (slicing machine)
- c. Máquina de fabricación de obtención de finas tiras (bamboo higo making machine)
- d. Máquina especial para el pulido y afilado de los extremos de las tiras / sierra circular
- e. Pulidora de piezas pequeña

Actualmente las maquinarias de control numérico computalizado (CNC)⁶ se pueden utilizar en laboratorios para la realización de cortes en latillas de las cañas, reemplazando las máquinas de “estrella” que evolucionaron de la de corte manual (fig. 109).

El grupo de investigaciones *X- Bamboo Group* de la Universidad de UCL, The Barlett School of Architecture (2014-2015 UCL)⁷, realizó una comparativa entre estas dos maquinarias, y como resultado observaron que las máquinas CNC al realizar latillas desperdician mas material en el corte. Los resultados de su observación determinan que la máquina tradicional de corte genera 373,6 centímetros cúbicos de residuos al realizar los cortes y la CNC genera 645,9 centímetros cúbicos. Por otro lado, el tiempo de trabajo se reduce al utilizar la CNC.

⁶ Son máquinas herramienta automatizadas operadas a través de electrónica digital computalizada especificando mediante sistemas de coordenadas los movimientos de la herramienta de corte.

⁷ Wonderlab research Cluster 5, Guan Lee, Vicente Soler. Bamboo Group: Zhenhua Luo, Jianhua Ren, Junwei Ren, Longfei Wang, Lina Lan. El objetivo del proyecto fue realizar la fabricación digital con bambú mediante herramientas y modelos digitales. (<https://issuu.com/longfeiwang1317/docs/11111>)

Fig. 110 Descripción de la relación entre las partes del bambú y los usos posibles.
Hidalgo, O. L. (1978). Nuevas técnicas de construcción con bambú. Estudios Técnicos Colombianos.

3.4. ASPECTOS FÍSICOS Y RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS FIBRAS DE BAMBÚ

3.4.1. La influencia de la edad de corte en el uso

La edad de corte de un bambú va directamente relacionada con la durabilidad, con la resistencia al ataque de insectos y hongos, con su deterioro y con la resistencia mecánica necesaria según el uso que se le dé (fig. 110) (Hidalgo, 2003).

Para la utilización de cañas de bambú para construcción tanto de uso permanente como temporal, para laminados y piezas estructurales, la caña debe tener entre 3 y 4 años de edad (Hidalgo, 2003). Se conoce como “madura”. El contenido de humedad en las cañas maduras es menor que en las jóvenes, es por ello que son cañas con mayor dureza que ayuda a que disminuyan los ataques de insectos y la presencia de hongos.

Para la utilización en tejidos de cestería, entrelazados artesanales, etc, se realiza el corte a la caña, de forma habitual, entre los 6 meses y el año de edad. Para la realización de tejidos se necesitan tiras con cierta flexibilidad, por ello tradicionalmente se utilizan cortes de cañas jóvenes de 1 año de edad habiendo alcanzado el crecimiento celular pero sin dejar que haya comenzado el nacimiento de las ramas. Estas cañas de bambú presentan una corteza con cierta flexibilidad, mayor que las cañas maduras (Hidalgo, 2003). Este proceso es adecuado para el trabajo de entramados a escala de cestería, donde no hay necesidad de obtener un material con alta resistencia mecánica y los cortes de las fibras son mas finas que las utilizadas en arquitectura.

Para la construcción de entramados a escala arquitectónica se requieren fibras de bambú que admitan cierta curvatura pero que sean fuertes a la vez. Lo idóneo será el corte de la caña desde los dos años de edad hasta los 4 años (hay variaciones dependiendo de la especie) para poder ser utilizado en esterillas (Hidalgo, 2003) y para la obtención de fibras de diversos cortes de la caña.

Para elementos constructivos industrializados como, por ejemplo, los suelos de bambú se utilizan cañas que fueron cortadas con alrededor de 5 años de edad, consiguiendo fibras fuertes y lignificadas.

Fig. 111

Fig.112

Tipo de corte	cortes	% Fibras	% Parénquima	Haces vasculares tipo II
Cortes radiales o centrífugos	1/2	20	25,5	346-530 hv/cm2
	1/4	10	12,75	81 -194 hv/cm2
	1/8	5	6,375	52-96 hv/cm2
Cortes transversales (caras)	exterior de 1/8	0,76	1,026	?
	medio de 1/8	3,695	4,71	?
	interior de 1/8	0,54	0,688	?

Fig.113

Fig. 111 cortes radiales o centrífugos de la *Guadua angustifolia* Kunth y su relación con los porcentajes de fibras y parénquima. Representación gráfica de los datos que se exponen en el artículo.

Fig. 112 Cortes transversales identificando caras del ancho de pared de la *Guadua angustifolia* Kunth y los porcentajes que identifican cada cara. Datos obtenidos a partir de la información expuesta en el artículo científico.

Fig. 113 Análisis de los porcentajes de fibras, parénquima y datos de los haces vasculares según los tipos de cortes y la zona dentro del ancho de pared de una caña de bambú de *Guadua angustifolia*. Porcentaje de fibras y parénquima calculados a partir de los datos expuestos en el artículo.

Fuente de los datos de las tres figuras y de los cálculos: Londoño, X., Camayo, G., Riaño, N., & López, Y. (2002). Caracterización anatómica del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. Seminario-Taller Avances sobre la investigación sobre *Guadua*.

Elaboración propia a partir de la información obtenida en dicho artículo científico.

3.4.2. Estudio de la caracterización anatómica en base a la escala del corte y la zonificación de los cortes de la *Guadua angustifolia*

A partir de la información obtenida en el estudio de la Caracterización anatómica del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth⁸ en Colombia (Londoño, Camayo, Riaño, López, 2002) se realizó una estimación de la información anatómica desde una caña entera a cortes de 1/2, 1/4 y 1/8 de caña (fig. 114).

En el estudio realizado por Londoño, Camayo, Riaño, López (2002) se identificaron zonas concretas de la *Guadua angustifolia*, mediante porcentajes, definidas por la densidad por unidad de área de haces vasculares y su tamaño que diferenciaron la periferia o cara externa, la transición⁹, la parte central y la interior (fig. 111 y 112).

A partir de los datos expuestos en el artículo científico de Londoño, Camayo, Riaño, López (2002) se realizó una tabla (fig. 113) en la cual se amplió la información, pudiendo obtener el porcentaje de fibras y parénquima de un corte de 1/8 de caña distinguiendo las caras interior (0,65-0,77 mm de ancho), media (4,9-16,34 mm de ancho) y externa (0,65-0,77 mm de ancho + 1,2-2,55 mm de ancho). Se tomaron como punto de partida para obtener los datos los porcentajes que se exponen en el artículo: 4,5% + 10,7% = 15,2% considerado parte externa, 73,9% considerada parte intermedia y 10,8% considerada parte interior del ancho de la pared de una caña. Otro dato que se obtuvo del artículo científico es la estimación del porcentaje de fibras y parénquima de un bambú *Guadua angustifolia* siendo un 40% de fibras y un 51% de parénquima. Tomando esa información se realizó un calculo rápido del porcentaje de fibras para cortes de 1/2 de caña, 1/4 de caña y 1/8 de caña, en cortes radiales, pudiendo obtener por regla de tres el porcentaje de fibras y parénquima en dichos cortes. También del mismo modo y a partir de los porcentajes obtenidos de fibras y parénquima en los cortes centrífugos de 1/8 de caña, se obtuvieron los porcentajes de fibras y parénquima distinguiendo por cara externa, media e interior (obteniendo la información sobre los porcentajes del ancho de pared

Fig.114 representación de la escala de algunos de los cortes de bambú con los que se puede trabajar
Elaboración propia

8 Estudio realizado a partir de la recolección de material en cuatro sitios diferentes de la zona del eje cafetero de Colombia. "Se analizaron caracteres anatómicos como tamaño, forma y distribución de haces vasculares, diámetro y porcentaje de metaxilema y porcentaje de fibras, a lo ancho de la pared del culmo y a lo largo del mismo." (Londoño, Camayo, Riaño, López, 2002).

9 Para la obtención de mas información a partir de dicha fuente de datos se consideró la periferia sumada a la transición como una única parte externa (4,5% + 10,7% según datos de la investigación (Londoño, Camayo, Riaño, López, 2002) .

*Fig. 116 Swirl (2004) cestería realizada por Ueno Masao
www.sites.google.com/site/bamboouenomasao/ (20200106)*

de las distintas caras del artículo científico consultado de Londoño, Camayo, Riaño, López (2002)).

En los resultados expuestos en la tabla (fig 113) se observa la influencia del área en el porcentaje de fibras y porcentaje de parénquima. Realizando una estimación rápida se obtiene que si la cara intermedia ocupara el mismo ancho que la cara externa entonces el porcentaje de fibras sería menor (0,56%). Lo que indica que la densidad por unidad de área es superior en la parte externa de la caña frente a las demás partes.

3.4.3. El curvado

“El curvado de un material es un proceso que busca darle forma a este por medio de una técnica pre definida para lograr el diámetro de curvado requerido. El curvado depende del diámetro de curvatura, el grosor del material a doblar y las propiedades de este “(Sidgman, 2014).

Las técnicas para realizar curvado son varias: mediante calor (fig. 115) o vapor de agua, mediante calor por fuego de manera indirecta, forzando la caña durante el crecimiento colocando guías para obtener la curvatura deseada una vez que alcance la edad necesaria para la utilización, entre otras.

Para curvados con calor y con vapor de agua se necesita conocer previamente el contenido de humedad del material, porque un exceso puede provocar la rotura o fisura de la caña. Sidgman (2014) describe el proceso y los factores que intervienen para curvar una caña de bambú. Sus estudios se basan en la experimentación con colihue¹⁰ en estado húmedo y seco. Se destaca la importancia del conocimiento de la cantidad de humedad que existe en la caña en el momento que se quiera curvar, indicando que cuanto mas humedad se evitará la rotura de la caña ya que el calor al que estará sometido el bambú lo que hará será calentar las moléculas de agua que contenga. Se indica que una humedad de 31% es la idónea para realizar la curvatura mediante la aplicación de calor en los puntos mas cercanos a los nudos, en los entrenudos (figura 115). Un bambú seco utilizando esta técnica de curvado con calor producirá una rotura en la dirección de las fibras

Fig. 115 Ubicación de las zonas de calor para curvado de la caña de bambú

Curvado con calor

Sidgman Rojas, J. (2014). Técnica de curvado simple para cañas de colihue en capas.

10 Bambú Chusquea culeou (Colihue). Natural de las zonas húmedas templadas de los bosques del suroeste de América Latina. Alcanza una altura de 6 m y diámetros de 4 a 6 cm, (https://issuu.com/sencico_documentosdigitales/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es)

Fig. 117. Cortes de latillas o tiras de bambú

X-Bamboo design project: 2014-2015 UCL, Bartlett AD, Wonderlab RC5 Team members: Zhenhua Luo, Jianhua Ren, Junwei Ren, Longfei Wang, Lina Lan.

(Sidgman, 2014).

Otro aspecto importante es que el calor puede afectar de distinta manera a la zona de los nudos y los entrenudos.

En el curvado con vapor, es conveniente alcanzar los 100° e ir forzando la curvatura, generando un proceso mas largo de trabajo pero de esta forma no se alcanzan máximos que pueden llevar a la rotura de las fibras.

En la práctica, se dice usualmente en términos generales que una caña de bambú puede curvarse un máximo del 10% de su longitud.

El estudio de la curvatura de las fibras de bambú en esta Tesis

Se pueden identificar diferentes escalas de estudio teniendo en cuenta la curvatura, como son:

La escala geométrica: donde se estudia lo que las superficies espaciales se curvan para su conformación. Se puede identificar un máximo de curvatura necesario para cada geometría.

La escala del tejido y del nudo de entramado: lo que el tejido se puede llegar a curvar teniendo en cuenta las superposiciones de las fibras en el nudo de entramado y la distancia del cambio de curvatura en el tejido que permita el cruce de las fibras.

La escala de la caña: o sea la longitud y diámetro de la caña o de la fibra (fig. 117) con lo que se obtendrá su radio de curvatura mínimo siempre en referencia a sus propias condiciones biomecánicas también.

Se puede observar que todos estos factores son dependientes ya que las posibilidades que ofrece el material y sus cortes van directamente vinculados al tejido y al nudo de entramado, y por último a la superficie geométrica que se busca construir (fig. 116).

Desde la parte mas pequeña de una superficie realizada con entramados, como puede ser el nudo de entramado y la curvatura que ahí se produce, ya existe una determinación que establecerá condiciones en las otras escalas.

3.4.4. Experimentación: Radio mínimo de curvatura según el corte

“Existe una constante en la curvatura y en el diámetro del bambú, cuando la curva que conforma la superficie incrementa el radio, la transición de diámetros de bambú

*Fig. 118 Bambú *Phyllostachys bambusoides* con el que se realizaron las pruebas de radio de curvatura de los distintos cortes, 2016.
Gijón, España
Elaboración propia*

grandes a pequeños se vuelve más suave (...) Por lo tanto, para una curva más grande, se recomienda un diámetro mas pequeño de bambú y una superficie más suave para evitar las curvaturas de radio pequeño” (Puig & Shan, 2014).

Se realizó una experimentación para la obtención del radio mínimo de curvatura en referencia a los cortes realizados a una caña de bambú (fig. 119 y 120).

Los objetivos de la experimentación fueron los siguientes:

- Obtención de cortes y toma de datos de las herramientas utilizadas.
- Evaluar las condiciones de humedad ambiente, temperatura y edad del material que se vincularan posteriormente a los resultados obtenidos.
- Obtener los radios de curvatura mínimos de cada corte.

Lugar: Universidad de Oviedo

Bambú utilizado:

- *Phyllostachys bambusoides* Sieb. et Zucc (fig.118)

Edad cuando se realizó el corte de la mata: menos de 2 años (fig.118)

Hora del corte: 10 hs.

Tiempo desde la realización del corte: 1 hora

Procedencia: Asturias, España

Estado: verde

Dimensiones: Longitud: caña de trabajo: 1,25 m

Diámetro: 3,5 cm

Ancho de pared: 5 mm

Distancia entre nudos: 29 cm

Sitio de obtención de las cañas: Oviedo (España)

Herramientas del taller:

- Hacha
- Serrucho
- Sierra radial de corte de madera
- Cinta de corte de madera de 5 mm

Fig. 119 y 120 Bambú *Phyllostachys bambusoides* con el que se realizaron las pruebas de radio de curvatura de los distintos cortes, 2016.
Gijón, España
Elaboración propia

Fig. 121, 122, y 123 Bambú *Phyllostachys bambusoides* con el que se realizaron las pruebas de radio de curvatura de los distintos cortes, 2016 2016, Gijón, España
Proyecto de investigación - Elaboración propia

Se realizaron cortes longitudinales de los siguientes tipos (figuras 119):
1/2, 1/4, 1/8 y 1/8: corte cara exterior, corte cara interior

Todas las pruebas se hicieron quitando los tímpanos¹¹ de las latillas en los nudos.

Se trabajó sobre una superficie plana, donde se colocó la latilla de bambú. Mediante dos sargentas sujetas a la mesa, se estableció un primer punto donde se apoyó uno de los extremos de la latilla, otro punto importante donde colocamos la segunda sargenta fue en la mitad de la longitud total de la latilla, a 0,625 cm, que fue el punto de inflexión donde se realizaba el giro. El otro extremo de la latilla quedaba libre y fue donde ejercíamos la fuerza y el movimiento de curvatura hasta el punto de rotura del material. Una vez llegado al colapso, tomamos medidas para obtener los porcentajes de curvatura.

Es importante recalcar que en este trabajo experimental no se tuvieron en cuenta ni la fuerza ejercida ni el tiempo transcurrido hasta la rotura, ya que el objetivo siempre fue la obtención del radio de curvatura mínima de las latillas relacionadas con el corte realizado, vinculado a las condiciones físico-anatómicas del material.

Observaciones generales después de las pruebas realizadas (fig. 121, 122 y 123)

-Las fibras cortadas de ¼ de caña se partieron en dirección transversal a las fibras, en el punto de flexión y en la cara externa al punto de flexión

-Las pruebas realizadas con las caras externas del bambú hacia afuera tardaron más tiempo en romper y la curvatura obtenida fue mayor.

-La media caña partió sólo a la mitad de la caña en el sentido longitudinal en la dirección de las fibras, no presentó rotura en la dirección transversal a las fibras

-Cuanto más fino es el corte, la latilla de menor dimensión, aumenta la flexibilidad.

-La cara interior muestra menos resistencia a flexión que la cara exterior de la caña de bambú.

-La rotura de las latillas en el sentido transversal a las fibras presenta rotura parcial, no se separan las latillas en dos partes

¹¹ Se denominan "tímpanos" a los tabiques de separación internos, transversales a la dirección principal de la caña, que se generan dentro de la caña de bambú donde las fibras se traban y cambian su dirección principal. El tímpano divide la caña en diafragmas estancos que desde fuera se ven como entrenudos.

*Fig. 124 y, 125 Bambú Phyllostachys bambusoides con el que se realizaron las pruebas de radio de curvatura de los distintos cortes, 2016, Gijón, España
Elaboración propia*

Resumen comparativo de las curvaturas obtenidas (en grados):

Probeta 1, corte 1/2 de caña: 93°

Probeta 2, corte de 1/4 de caña: 130° (fig. 124)

Probeta 3, corte de 1/2 de caña: 77° con cambio de cara ext hacia adentro (fig. 123)

Probeta 4, corte de 1/4 de caña: 77° con cambio de cara ext hacia adentro

Probeta 5, corte de 1/8 de caña: 191°

Probeta 6, corte de 1/8 de caña sólo de la cara externa: 161°

Probeta 7, corte de 1/8 de caña sólo de la cara interior: 10° (fig. 125)

Como primera consideración sobre la experimentación con un material natural como es el bambú se puede decir que resulta de importancia identificar el género y la especie con la que se trabaja para conocer su estructura anatómica particular que será de gran influencia en su respuesta mecánica. Esto a su vez permite saber si es una especie autóctona o adaptada al sitio donde se extrae la planta como probeta. Su morfogénesis viene determinada por la distribución organizada de su sistema interno dando respuesta al medio ambiente donde se encuentra.

En particular en esta experiencia al ser una especie adaptada, aunque sus características generales son las mismas, el proceso de adaptación geográfico pudo generar modificaciones físicas en la planta. Por todo esto, la experimentación con bambú determinará un resultado particular dependiendo de sus propias características, su origen, las condiciones en el momento de corte, su ambiente, etc.

En relación a los tipos de rotura obtenidos se observa que el ensayo con la media caña tuvo como resultado la rotura en la dirección de las fibras sin presencia de rotura transversal. Los cortes de 1/4 de caña y 1/8 de caña presentaron rotura transversal parcial de las fibras, sin llegar a separarse en dos, en el punto de inflexión, en la cara externa del bambú donde mas presencia de sílice hay.

Se puede afirmar que cuanto mas fino es el corte que se realiza aumenta la flexibilidad de la pieza y se evidencia en el corte de 1/8 de la caña llegando a obtener 191° de curvatura.

Al igual que en el estudio teórico de la flecha que se realizó, se puede observar en los resultados experimentales un salto en la radio de

Fig. 126 Comportamiento típico en el curvado de tiras de bambú dependiendo de la ubicación de la cara externa e interna.

Obataya, E., Kitin, P., & Yamauchi, H. (2007). Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. *Wood science and technology*, 41(5), 385–400.

curvatura admisible entre los cortes de 1/4 de bambú y 1/8.

Se observa que la cara interior tiene menos resistencia a flexión que la cara exterior de la caña de bambú que presenta mayor gravedad específica (fig. 126). También, comparativamente, se observa que el corte de 1/8 de caña de bambú donde se mantuvieron las dos caras de la caña admitió un radio de curvatura menor frente a los ensayos hechos discriminando las caras con la misma geometría de corte. Este aumento de la flexión es debido al equilibrio que se genera entre la sección exterior con mayor presencia de fibras y mejor respuesta a tracción y la cara interior con su estructura de “esponja” con mayor porcentaje de parénquima que tiene mayor resistencia a compresión.

Esta experimentación pone énfasis en la importancia de relacionar disciplinas para la obtención de datos completos en el estudio de los materiales naturales.

Dicha experimentación fue redactada en un artículo científico que fue publicado por la revista indexada Anales de la Edificación en diciembre de 2018 ¹².

3.4.5. La tensión de flexión de las fibras de bambú

La corteza o tejido mecánico se encuentra en la parte externa de la caña, cuya función es proteger la caña por lo que puede resistir mayormente los esfuerzos de flexión.

Takenouchi¹³, estudió la relación existente entre el ancho de las paredes de las cañas de bambú y la tensión de flexión admisible de estas. Observó que las cañas donde el ancho de pared es 1/8 o 1/5 del diámetro son mas resistentes a flexión que otras, hasta de los bambúes que son sólidos sin presentar hueco central. Esta “regla” valoriza el conocimiento de la especie con la que se va a trabajar relacionando su anatomía, su condición física y su resistencia mecánica consecuencia de ello. Las especies asiáticas del género *Phyllostachys* que en muchas ocasiones se las puede encontrar en la parte alta de las montañas resistiendo a las bajas temperaturas y al peso de la nieve presentan un ancho de pared de 1/9 de diámetro del cilindro (*Phyllostachys bambusoides* (Madake) y *Phyllostachys nigra* hensis (Hachiku))(Hidalgo, 2003).

¹² Artículo adjunto en anexos de este documento.

¹³ Studies of bamboo. Yoshio Takenouchi Yokendo, Tokyo, Japan, 1932.

Fig. 127y 128 Relación momento flector - curvatura donde se evalúan el comportamiento de las caras externas, medias e internas de dos probetas de bambú *Phyllostachys pubescens*.

B12: Cara externa - media

B3: Cara interna

Obataya, E., Kitin, P., & Yamauchi, H. (2007). Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. *Wood Science and Technology*, 41(5), 385-400

“De acuerdo con Bauman (1912), la tensión de flexión de las capas interiores es de 950kg/cm², y la parte externa es de 2535 kg/cm² “ (Hidalgo, 2003).

Las tiras de bambú colocando la epidermis hacia abajo tienen mayor resistencia a flexión y módulo de elasticidad que las tiras con la cara externa hacia arriba , según los resultados que obtuvimos en la experimentación (fig. 118).

Hidalgo (2003) indica que la tensión de flexión de las cañas de bambú va desde 722kg/cm² y 2760kg/cm². También puntualiza que la cara exterior de la caña de bambú tiene 2 a 3 veces mas flexión que la cara interior con menor porcentaje de fibras y mayor cantidad de parénquima. Las cañas al ser cónicas disminuyen su diámetro en la parte mas alta donde el grosor de pared también es menor aumentando su gravedad específica por la presencia de mayor cantidad de fibras frente al parénquima, esto tiene como consecuencia el aumento de la flexión y el módulo de elasticidad en este punto (Hidalgo, 2003).

Curvatura

El bambú permite gran flexibilidad desde la cara exterior que mantiene la tensión como la parte interior esponjosa con gran resistencia a la deformación a compresión. La combinación de la cara externa mas rica en fibras y la parte interna compresible son responsables de dar ductilidad a la flexión de las tiras de bambú.

Obataya, Kitin, Yamauchi (2007)¹⁴ realizaron un experimento utilizando diferentes tipos de cortes con *Phyllostachys pubescens* de 3 años de edad para evaluar la flexión vinculada a la anatomía (fig. 127 y 128).

Como resultado de sus observaciones indican que el parénquima es capaz de absorber las sollicitaciones a compresión por su estructura, pero al no tener rigidez actúa de forma distinta a las fibras. Sin embargo trabaja de forma colaborativa con las fibras al evitar que se deformen haciendo de sostén. Estas observaciones son de relevancia sobre todo en el estudio de las caras interiores de la caña con mayor presencia de parénquima (Obataya, Kitin, & Yamauchi, 2007).

Se plantea la pregunta sobre si es realmente flexible el bambú como habitualmente se dice. Obataya, Kitin, & Yamauchi (2007) indican que en caso de realizar una comparativa con otros materiales como puede ser la madera, entonces, el bambú es mas flexible ya que admite

¹⁴ Obataya, Kitin, Yamauchi (2007) trabajaron con bambúes para evaluar la flexibilidad bajo las siguientes condiciones: 20 grados de temperatura y 60% de humedad relativa durante 6 meses.

Fig. 129 Vo Trong Nghia Architects. Pabellón de bambú Vinata, Vietnam, 2018.
www.plataformadelaarquitectura.cl (20191130). Fotos de Hiroyuki Oki

mayor curvatura antes de su rotura. Posteriormente puntualizan diferenciando flexibilidad de elasticidad, ya que no es un material que se recupere una vez retirada la carga a la que se lo somete (Obataya, Kitin, & Yamauchi, 2007).

Análisis de la curvatura admisible del bambú según el corte

Para el estudio en concreto de esta investigación resulta de gran interés identificar la curvatura admisible de los cortes susceptibles de ser utilizados en la construcción de estructuras tejidas con bambú (fig. 129). Para ello se describen a continuación cuatro metodologías para el planteamiento analítico, de manera teórica, de diferentes aspectos de interés:

- Flecha máxima según el corte

Estableciendo una carga puntual P y conociendo los siguientes datos:

E = Módulo de elasticidad, es una constante que varía según la especie de bambú analizada.

L = Longitud del corte analizado, es un dato concreto del corte

I = Momento de inercia, varía según el corte. Se partirá de un diámetro " D " de la caña de bambú concreto y de un diámetro " d " interior de la caña (descontando las paredes)

$$\text{La Flecha máxima} = 1/48 * PL^3 / EI$$

- Curvatura máxima según corte: Inversa del radio

$$1/R = (8PL/48E) / I$$

Para resolver la fórmula se necesitan los mismos datos que para la flecha máxima.

- Flecha de nudos de entramado con cortes variables

Mediante el método de compatibilidad

$$P = L / (6EI) + L / (6EI')$$

- Coeficiente de esbeltez según el corte:

E = Módulo de elasticidad, es una constante que varía según la especie de bambú analizada.

A = área es dato

L = Longitud del corte analizado, es un dato concreto del corte

α = Depende del enlace de los extremos

I = Momento de inercia, varía según el corte. Se partirá de un diámetro " D " de la caña de bambú concreto y de un diámetro " d " interior de la

caña (descontando las paredes)

$$\lambda = \alpha L \sqrt{EA} / EI$$

3.4.6. Esfuerzo cortante y el coeficiente de Poisson

El esfuerzo cortante

A diferencia de otras plantas como los árboles, el bambú no tiene una estructura radial, su anatomía se ordena de forma longitudinal, a excepción de los nudos donde las fibras se colocan de manera transversal. Esta disposición trae como consecuencia su escasa resistencia al esfuerzo cortante, que en el caso del trabajo con tiras por ejemplo para entramados o tejidos, o la formación de cuerdas, por el contrario es un beneficio ya que facilita el corte de las tiras (Hidalgo, 2003). Para la utilización de las cañas en construcción se necesitan cortes concretos para realizar los puntos de unión y cruce entre cañas, para evitar el trabajo a cortante y enfatizar el uso de estructuras que trabajen a compresión (en la dirección de las fibras) o a tracción.

Los cortes utilizados hasta la actualidad para la formación de estructuras son los denominados: “Boca de pescado” y “Pico de flauta” (fig. 130), también se pueden agregar los cortes oblicuos¹⁵.

“Boca de pescado” es utilizado para encuentros entre pilares y vigas a 90°. Este corte en el pilar permite el apoyo de la viga. Se realiza el corte cercano a los nudos de la caña, ya que es el punto donde las fibras rigidizan el bambú al cambiar de dirección y donde las fibras son mas cortas. “Pico de flauta” es un corte que se utiliza cuando se requiere un encuentro inclinado (60° por ejemplo) manteniendo una parte recta, comúnmente en cubiertas. Es más difícil de ejecutar manualmente.

El coeficiente de Poisson

La constante elástica denominada coeficiente de Poisson¹⁶ es la constante del estrechamiento de un elemento sometido a una fuerza. Es el cambio que se produce en las dimensiones originales de la probeta (material elástico e isótropo) ya que al someterse a una fuerza

Fig. 130 Dibujos de los cortes para uniones de pico de flauta y boca de pescado
Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Lopez.

¹⁵ Los cortes oblicuos o a bisel son cortes enteramente en diagonal para encuentros con elementos horizontales y verticales. Son más fáciles de ejecutar manualmente que los otros dos cortes.

¹⁶ El nombre del coeficiente se dio en honor al físico francés Simeon Poisson. Se utiliza la letra griega ν (Ortiz, 1998).

Figura 131

Figura 132

Fig. 131 Relación de Poisson - Basa / Cepa en la cara externa, interna media y el total de la caña de bambú *Guadua angustifolia*. Comparación con otros materiales

Fig. 132 Relación de Poisson - Basa / Cepa en la cara externa, interna media y el total de la caña de bambú *Guadua angustifolia*. Comparación con otros materiales

Saraz, O., Alexander, J., Vélez Restrepo, J. M., Velásquez, C., & José, H. (2007). Determinación de la relación de Poisson de la *Guadua angustifolia* kunth a partir de procesamientos de imágenes y su relación con la estructura interna. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 60(2), 4067-4076.

de compresión se reducirá el lado que recibe la fuerza y se ensanchará en el contrario.

En las cañas de bambú, este coeficiente varía según dónde se realice el corte de la caña debido a la relación directa con la anatomía de estos.

El estudio experimental de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth realizado por Saraz, Alexander, Vélez Restrepo, Velásquez, & José (2007) evalúa el coeficiente de Poisson en las diferentes estructuras internas de la caña de bambú (figuras 131 y 132):

En la corteza y en la zona media del ancho de pared al tener mayor cantidad de fibras que de parénquima es mas resistente a la deformación de Poisson. El coeficiente de Poisson se observa que aumenta en relación a la presencia de parénquima, es por ello que principalmente se puede ver en la cara interna de la caña de bambú (Saraz, Alexander, Vélez Restrepo, Velásquez, & José, 2007).

La sección transversal de la *Guadua* se dividió en tres capas, aunque Londoño, Riaño y Camayo (2002), describen cuatro zonas en el espesor total: la corteza que se denominó como zona externa y corresponde al 15,3% del ancho total; la zona media con un 73,9% del ancho total y la zona de la cara interna con un 10,8 % del ancho total (Saraz, Alexander, Vélez Restrepo, Velásquez, & José, 2007).

Como datos generales se extraen: El corte para la experimentación se realizó en la basa y en la cepa, la temperatura y humedad del ambiente fueron de 22° y 65%.

El análisis muestra el contenido en porcentaje de fibras, parénquima y tejido conductivo según el corte realizado, y el coeficiente de Poisson en relación a las zonas de corte externa, media e interna. Los valores obtenidos sobre el estudio de la *Guadua angustifolia* Kunth varían entre 0,22 y 0,35 describiendo la anisotropía del material general, mostrando como la estructura anatómica influye directamente en el comportamiento mecánico (Saraz, Alexander, Vélez Restrepo, Velásquez, & José, 2007).

Fig. 133 Wen – Chih Wang, 2019. *Love of Shodoshima*, Setouchi Triennale, Japón
Se muestra tejido hexagonal abierto con poca densidad de fibras entre otros tejidos como los de trama y rdimbre y tejido irregular o no tejido.
www.japantravel.navitime.com (20190906)

CAPÍTULO 4 LOS ENTRAMADOS Y LA GEOMETRÍA DEL ESPACIO

4.1. TEJIDO Y GEOMETRÍA EN LA NATURALEZA

“Los patrones aparecen en todos los sistemas naturales, y la frecuencia y ocurrencia de determinados patrones geométricos (en particular triángulos, pentágonos y espirales) en muchas organizaciones diferentes y a través de escalas enormemente divergentes. Estos patrones son genéricos, y por lo tanto se puede decir que la auto-organización biológica es esencialmente geométrica” (Weinstock, 2006).

El físico japonés Sumio Iijima¹ estudió los tejidos de cestería, la fricción en los nudos de entramados y la repetición geométrica que dieron lugar al descubrimiento de los nanotubos de carbono (fig. 125). Estableció paralelismos entre la cestería y los nanotubos, pero no ha realizado publicaciones al respecto donde poder conocer los resultados de sus investigaciones.

Iijima relacionó la geometría de la cestería tradicional japonesa hexagonal (Kagome ami) (fig. 133) con los nanotubos de carbono, ya que se generan en los dos casos mediante geometrías de cinco, seis y siete lados. Son hexágonos y pentágonos que constituyen las diferentes formas (Calder, 2005).

El descubrimiento de las nuevas formas del carbono llamados “Fullernos” o “Bucky-ball” en nanotecnología asemeja su geometría a la de un balón de fútbol formado por pentágonos (12) y hexágonos (20) (figura 134). Reciben este nombre haciendo referencia a Buckminster Fuller quien desarrolló las cúpulas geodésicas en base a la relación de hexágonos y pentágonos.

La histología, que es la especialización en las ciencias biológicas, se dedica al estudio de los tejidos. Los tejidos en la naturaleza (fig. 135) son estructuras que forman conjuntos de células que se organizan para cumplir funciones comunes. La formación de entramados a partir de la reagrupación artificial de fibras guarda gran similitud con los tejidos

Fig. 134 d. Fulleno C60
h. Nanotubos de carbono
Created by Michael Ströck
(mstroeck), CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=584786> (20190906)

Fig. 135 Crecimiento de radiolarias fruto del proceso morfo-genético
www.radiolarias.org
Medina, V. H. D. de, Mac-ruz, A., & Ginés, P. (2015). Procesos morfogenéticos en el diseño arquitectónico. *Blucher Design Proceedings*, 2(3), 637–641.

¹ Físico japonés que realizó estudios sobre nanotecnología y materiales. Los nanotubos (C₆₀) fueron descubiertos por Iijima en 1991 en la Nec Corporation's Fundamental Research Lab en Japón. Actualmente desarrolla su actividad como profesor en la Universidad Meijo (Seúl, Corea).

*Fig. 136 Marco Casagrande, 2012. Cicada. Taipei.
www.plataformade laarquitectura.cl (20191130) foto de adDa*

presentes en la naturaleza, ya que en los dos casos se rigen bajo una ley geométrica, la estructura de sostén que es en sí misma la disposición en equilibrio de las partes del tejido.

Naboni y Breseghello (2015) definen el término “tejido” como la construcción de un conjunto de tiras o hebras entrelazadas que requieren de un material flexible por sus curvaturas internas (fig. 136). Hacen una distinción entre las partes que intervienen en su conformación como el material, el patrón de entrelazado y el conjunto que constituyen. Diferencian dos escalas de trabajo: la macro y la micro escala. La sección del material y su tipología anatómica determinan la tipología admisible del patrón de entrelazado que se traba por la fricción de sus tiras y que requiere a su vez flexión por el movimiento de la trama y urdimbre (Naboni y Breseghello, 2015).

La regularidad de la naturaleza

La naturaleza presenta infinidad de relaciones geométricas, repeticiones y simetrías. Está presente además la proporción geométrica en la naturaleza, la espiral logarítmica, el crecimiento gnomónico y la repetición variando la escala.

Todos los organismos que conforman el Universo están regidos bajo las leyes de la geometría “La geometría es la manifestación plástica de una ley de formación “ (Araujo, 2004). Las formas de la naturaleza están determinadas como una relación entre las leyes físicas y la geometría mas óptima para los esfuerzos a los que estará sometida. Hay una búsqueda de la eficiencia disminuyendo el material solo a lo necesario al igual que a las secciones óptimas (Araujo, 2004).

Según describe Araujo (2004), la voluntad de obtener la geometría mas adecuada con los mínimos recursos se puede determinar como “óptico mecánico”. Geometrías cuya sección se adapta a los esfuerzos, las cuales pueden ser varias y diferentes pero todas son capaces de resistir la misma tensión a la que están sometidas.

4.1.1. Las construcciones tradicionales de bambú con presencia de entramados

Fig. 137 Violet Le Duc,, 1876. The Toradja house. Perspectiva y plano de la vivienda tradicional China hecha con bambú
Hidalgo, O. L. (2003). Bamboo: The gift of the gods. O. Hidalgo-Lopez.

A mitad del Siglo XIX Gottfried Semper² planteó una nueva dirección en el pensamiento sobre los orígenes de la construcción vernácula (Muslimin, 2010). En su libro “Los cuatro elementos de la arquitectura”, Semper describe que las artes mas primitivas tienen que ver con los tejidos y la realización de nudos con fibras naturales.

Para Semper el inicio de la construcción, la arquitectura vernácula, coincide con el comienzo de los trabajos de textiles entramados con fibras. Argumentaba que los cerramientos utilizados en arquitectura procedían de la técnica textil, esto cuestionaba los orígenes academicistas de la arquitectura vinculados a Vitruvio³ y a los órdenes clásicos. Este planteamiento de Semper establecía una nueva relación entre la envolvente arquitectónica y el recubrimiento textil, que instauraba nuevas formas de entender el concepto de envolvente en arquitectura para delimitar un espacio (Rueda & Pizarro, 2014).

En 1860 Semper publica el escrito “El Estilo”, el tratado donde desarrolla los conceptos de su teoría ya establecidos en su primer libro. En el capítulo dedicado al arte textil, teoría y técnica artística, utiliza análisis científicos y etimológicos, basados en la biología y los orígenes antropológicos del arte textil. Tiene en cuenta además las artes aplicadas, transformación de la materia, mecanismos por los cuales una tipología debe modificar su técnica para adaptarse a un cambio de materialidad en nuevos entornos (Rueda & Pizarro, 2014). La técnica textil implicaba el conocimiento de los materiales con los que se trabajaba, los esfuerzos que cada fibra y tejido podían soportar (fricciones y tensiones), al igual que los nudos necesarios para cada función.

Según describe Hidalgo (2003), hay diferentes restos de construcciones de viviendas vernáculas hechas con bambú que pudieron identificarse en América Latina. En Ecuador se hallaron viviendas con técnicas de tejido con tiras de bambú y en Perú se encontraron construcciones hechas con bambú y barro con una antigüedad estimada en 3.500 años. Se pudo observar que para varias de estas técnicas constructivas se utilizaron bambúes paquimorfos, que presentan mayor gravedad específica lo que les da mayor resistencia y dureza que los monopodiales o leptomorfos.

2 Gottfried Semper (1803 – 1879), arquitecto alemán, ecléctico. Tuvo gran interés en la reflexión sobre los aspectos técnicos de la arquitectura y el arte del Siglo XIX.

3 Marco Vitruvio Polión (80-70 a.C. - 15 a.C.) fue arquitecto , ingeniero, escritor romano del Siglo I a.C. Autor del tratado De Architectura (Los Diez Libros de Arquitectura) donde se describen aspectos de la arquitectura de la antigüedad clásica.

Fig. 139 The Toradja house
Hidalgo O.L. (2003). Bamboo: The gift of the gods. O. Hidalgo-López.

En Asia el bambú constituye un material muy apreciado históricamente tanto para construcción como para otras disciplinas. Se utiliza principalmente para cerramientos de viviendas mediante la técnica de tejidos planos y para las cubiertas⁴ (Hidalgo, 2003).

Particularmente en China las construcciones con bambú forman parte de la tradición de la población. En el libro "Habitations of Man" Violet-Le Duc⁵ (1876) realiza unos dibujos descriptivos de la vivienda tradicional China edificada en bambú (fig. 137). Sus dibujos muestran el trabajo de los tejidos planos con tiras de bambú que dejan ventilar la vivienda. Es habitual observar el trabajo de en las cubiertas de las edificaciones Chinas realizado con bambú (fig. 138) y mezclando otros materiales como la cerámica o la piedra (Hidalgo, 2003).

En Asia, particularmente en el Sureste, se conoce la casa tradicional Indonesia llamada The Toraja House⁶ (fig. 139), en la cual se utilizaban las cañas de bambú para construir la estructura de la cubierta cuya forma viene influenciada por la construcción de barcas y constituye un diseño sostenible basado en la ventilación natural cruzada. Además el bambú en forma de tejidos está presente en las paredes que limitan la vivienda hacia el exterior y en la conformación estructural del suelo elevado mediante vigas (Hidalgo, 2003).

Havell (1913) (Hidalgo, 2003) describe que las cubiertas determinan los períodos tipológicos de la construcción India. Se pueden identificar tres etapas, comenzando con la utilización del bambú para realizar la estructura de la cubierta, posteriormente se sustituye por madera, y como última etapa el ladrillo o la piedra reemplazan los trabajos en madera.

En zonas como Tripura o Mizoram (India) se construye The riang house y Mizo houses Lushai tribe (fig. 140) en las cuales el bambú es el material constructivo principal, tanto los cerramientos que se construyen con entramados ortogonales de bambú como la estructura (Ranjan, Iyer, N., & Pandya, 1986).

En África también se construye con bambú, Walter Liese (1998) describe que en Etiopía sólo crecen dos especies de bambú que son *Arundinaria*

Fig. 138 Construcción de la cubierta tradicional China con tejas de bambú
Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Lopez.

Fig. 140 Mizo houses in India.
Ranjan, M., Iyer, N., & Pandya, G. (1986). *Bamboo and cane crafts of Northeast India*. Development Commissioner of Handicrafts, Govt. of India.

4 Muchas veces las tejas utilizadas en las cubiertas son de bambú.

5 Eugene - Emmanuel Violet Le Duc (1814-1879) arquitecto francés, escritor y arqueólogo.

6 Toraja es una región montañosa de Indonesia. Torajan homes se denominan a las construcciones ancestrales de dicha zona. La población originaria proviene de Indochina y se cree que llegaron a esas tierras con sus barcos los cuales utilizaron como cubiertas para protegerse en un principio.

Fig. 141 Cench house en Etiopía
Hidalgo, O. L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Lopez.

Fig. 142 Cench house en Etiopía
sergiopessolano.it / www.pinterest.se/pin/19984792073875729/

alpina (K. Schum) y *Oxytenanthera abyssinica* (A. Rich) Munro. Liese especifica que el bambú monopodial *Arundinaria alpina* (K. Schum.) crece en zonas altas desde los 2.000 m a los 3.500 metros de altura, al este de África, en zonas húmedas. Alcanza una altura de 12 a 20 m con diámetros de caña que van desde 8 cm a 12 cm. Las paredes de la caña en la base son de 16 mm y en la parte apical pueden alcanzar los 5 mm. Con esta especie de bambú se pueden realizar fácilmente cortes en tiras para la realización de entramados y cestería. Por otro lado, *Oxytenanthera abyssinica* (A. Rich) Munro es una especie que crece en la zona oeste de Etiopía a una altitud de 700 a 1800 m. Es un bambú fuerte simpodial que se agrupan en densos conjuntos con cañas de 6m a 10 m de altura. En la base el diámetro de la caña va de 3 a 8 cm. Son sólidas cañas que pueden desarrollar una pequeña cavidad central dejando fuertes y gruesas paredes, es por esta razón que son difíciles de cortar y dividir en tiras para utilizarse en cestería o tejidos (Liese, 1998).

En Etiopía, se construyen popularmente las viviendas cónicas tejidas y existen dos tipologías de domos entramados con bambú. Las construcciones llamadas Chench (figura 141 y 142) se pueden encontrar en zonas cercanas al lago Margarita, al sur de la ciudad de Boroda donde se ubica la tribu Dorze. El tejido cubre toda la superficie de la vivienda desde el suelo hasta la cumbrera.

La técnica constructiva de estas viviendas (figura 141 y 142) permite ir adaptándose al paso del tiempo. Las viviendas se tejen con una altura de hasta 8 metros y con un diámetro de unos 6 metros. Se plantean de este modo ya que el tejido de bambú al estar en contacto directo con el terreno recibe el agua y se pudre con el tiempo, por lo que la vivienda va bajando de altura al hundirse naturalmente. El proceso constructivo parte del replanteo de una base circular en el terreno, que a modo de cesta, requiere de unos cortes de bambú que harán de urdimbre distanciados cada 10 cm, otros cortes realizarán la trama del tejido torsionándose entre la urdimbre. Para finalizar se cubre al exterior de hojas caulinares⁷ a modo de protección impermeable del entramado de bambú. Otras construcciones tradicionales son las sidamo bamboo house, que a diferencia de las anteriores utilizan un soporte estructural en el centro. Se utilizan también para su construcción hojas caulinares pero en esta tipología se colocan en medio del tejido, ya que este cerramiento se realiza con dos capas de entrelazados formando la vivienda con paredes bicapa (Hidalgo, 2003).

⁷ Se llaman hojas caulinares a aquellas que protegen la caña y sales directamente cubriéndola en los primeros años de crecimiento. Las hojas caulinares son características de cada especie de bambú y pueden reconocerse por sus particularidades.

*Fig. 143 Abe Motoshi, 1997. Flower basket, Rippling Waves, Japón
Bambú Madake y rattan. Cestería torsionada.*

Rinne, M. M., & Okada, K. (2008). Masters of Bamboo: Artistic Lineages in the Lloyd Cotsen Japanese Basket Collection:[exhibition, San Francisco, Asian Art Museum, Feb. 2-May 6, 2007]. Asian Art Museum.

4.2. TÉCNICAS DE ENTRAMADOS

4.2.1. El uso histórico del entramados con fibras naturales

“El origen de las técnicas de tejido hay que buscarlo en el arte de la cestería, que para algunos autores es anterior incluso a la cerámica, de la cual pudo asimismo constituir el armazón interno de las primitivas piezas, de donde surgiría la idea de confeccionar recipientes simplemente de arcilla”(Giner, 1984).

La cestería se conforma con variedad de entramados y geometrías que en muchas ocasiones identifica una cultura o tradición. Son superficies entrelazadas planas o volumétricas definidas por una técnica realizada con un material local. Se necesitan de dos o mas fibras para lograr los nudos de entrelazado que fijarán el tejido, para ello se trabaja con fibras con cierta flexibilidad que admitan la curvatura de la trama (fig. 143, 144 y 145).

Adovasio (1977), define la cestería como elementos de artesanía rígidos o semi-rígidos y que en algunas ocasiones pueden tener usos concretos como puede ser la pesca, caza, contenedor de alimentos, etc. que son los mas tradicionales. Es una técnica que se estima tiene una antigüedad de unos 11.000 años.

Los tejidos o entramados pueden ser planos como es el caso de las esterillas que consisten en formas esencialmente en dos dimensiones, ó otras muchas formas que son en tres dimensiones como la cestería hasta la arquitectura tejida.

La clasificación

“La clasificación en cestería va ligada a la taxonomía de las plantas o animales vivos o extinguidos”(Adovasio, 1977).

Las tipologías de entramados se pueden englobar en tres grupos conocidos como: Plaited (entrelazado), Coiled (bobinado o enrollado) y Twined (torsionado). Cada cultura practica tradicionalmente una o varias técnicas, que están vinculadas a las fibras naturales que estén a su alcance y a las posibilidades de manipulación.

Fig. 144 Sugita Jozan, 1998. Flower basket,, Japón. Bambú madake y rattan. cestería hexagonal. entrelazada Rinne, M. M., & Okada, K. (2008). *Masters of Bamboo: Artistic Lineages in the Lloyd Cotsen Japanese Basket Collection*:[exhibition, San Francisco, Asian Art Museum, Feb. 2-May 6, 2007]. Asian Art Museum.

Fig. 145 Iizuka Hosai, 1900 ?, Flower basket, Katsura River, Japón. Bambú madake cestería torsionada. Rinne, M. M., & Okada, K. (2008). *Masters of Bamboo: Artistic Lineages in the Lloyd Cotsen Japanese Basket Collection*:[exhibition, San Francisco, Asian Art Museum, Feb. 2-May 6, 2007]. Asian Art Museum.

Fig. 146 Tipos de tejido torsionado diferenciando las urdimbres y las tramas.

Adovasio, J. M. (1977). *Basketry technology: a guide to identification and analysis*. Routledge

a. *Cestería twined (torsionada)*

Este tipo de tejido está compuesto por unas fibras activas y otras pasivas. Las urdimbres son las fibras en tensión, fijas, entre las que se tejerán las tramas que son las fibras activas (figura 146).

El ritmo, la densidad del entramado, el grado de apertura y las superposiciones de tramas y urdimbres dependerá de cada cultura y de cada tejido particular (figura 145 a, b, c, etc.).

La dimensión y tipo de fibra en muchos casos se diferencia también entre urdimbre y trama, ya sea por la propia búsqueda estética o funcional del tejido, o por las características particulares que otorgan diferentes fibras las cuales son más adecuadas como trama por su flexibilidad o como urdimbre por su rigidez.

Esta técnica es utilizada también a escala constructiva conocida como quinchas o bahareque. Se puede encontrar en arquitectura para el armado de paneles de separación, como entramado estructural de muros sobre los que se puede colocar barro para dar terminación y protección, para ventanales o paredes.

Se puede diferenciar entre las técnicas de bobinado y torsionado por el uso de las fibras y por la cantidad de fibras utilizadas en los tejidos. La orientación de las fibras también los diferencia. En los dos casos, se sabe que la fibra utilizada como urdimbre será generalmente más resistente ya que deberá aguantar la tensión ejercida por la trama que es el “relleno” del tejido. En la técnica de torsión las urdimbres se colocan de forma vertical y se utilizan fibras dobles o triples para realizar la trama a diferencia del bobinado que utiliza una sola fibra (Adovasio, 1977).

Tipos de torsionados

Los tipos se pueden distinguir por el ritmo de espaciado, por la secuencia entre las tramas (abierto, cerrado y abierto, cerrado) y por el ritmo de cruce entre trama y urdimbre (diagonal, simple, cruzado, etc.)

Tipología de fibras

Se puede trabajar con urdimbres rígidas, semirígidas y flexibles,

Fig. 147 Tejido enrollado

Fig. 148 Tejido entrelazado

Adovasio, J. M. (1977). *Basketry technology: a guide to identification and analysis*. Routledge

dependiendo de las fibras o de la composición de fibras, ya que tanto la urdimbre como la trama puede constituirse por una sola fibra o por un conjunto de fibras. Cuando se teje con bambú, por ejemplo, una fibra aportará un alto grado de flexibilidad, un conjunto de fibras aumentará el rozamiento y disminuirá la flexibilidad y los cortes de mayor dimensión necesitarán mayor longitud para ampliar su radio de curvatura que necesitarán las fibras para entretejer la trama y la urdimbre.

Nudos y empalmes para dar continuidad a las fibras de tramas

Adovasio (1997) especifica que se pueden distinguir dos formas de dar continuidad a las fibras del tejido de cestería: Las de nudo o las de continuidad con empalme.

Las de nudo son las que atan la trama una vez finalizada, o se enrollan en la urdimbre, también pueden ser atadas dos tramas si la fibra utilizada lo admite.

Los empalmes dan continuidad a las tramas y urdimbres. Cuando se trabaja con fibras naturales es prácticamente imposible no recurrir a empalmes para la realización de tejidos. La técnica de empalme se realiza superponiendo el final de una de las fibras con el principio de la nueva trama que se utilizará. La superposición dependerá en la mayoría de los casos de la distancia a la que se ubiquen las urdimbres, ya que si se disponen de forma cercana habrá mas fricción entre las fibras, pero si se trata de un entramado mas abierto, los nudos de entrelazado y los empalmes de fibras deben estar bien asegurados para evitar la apertura del tejido.

b. Cestería de Coiled (bobinado o enrollado)

Puede ser enrollado abierto o cerrado (fig. 147). Esta técnica es, por ejemplo, utilizada para construcción en zonas como Ruanda o Nigeria, donde con fibras locales construyen viviendas con tejido enrollado desde un punto central en lo mas alto de la vivienda hacia los lados (fig. 149 y 150).

c. Cestería plaited (entrelazado).

Pueden ser cruces simples o diagonales con ángulos fijos que son habitualmente de 90º, se realizan generalmente por repetición (fig. 148).

Fig. 149 Construcción con la técnica de tejido enrollado en Ruanda con fibras locales.
Larsen Payá

Fig. 150 Construcción con la técnica de tejido enrollado en Nigeria con fibras locales.
niger flickr COSPE
www.africavernaculararchitecture.com/niger/ (20190906)

Fig. 151 Tejidos entrelazados o torsionados hexagonales

A. Con urdimbre vertical y trama diagonal

B. Con urdimbre horizontal y trama diagonal

Mooney, D. R. (1986). *Braiding Triaxial Weaves: Enhancements and Design for Art-works*. *Ars Textrina*, 5, 9-31.

Esta técnica utiliza fibras simples o fibras con resistencia, flexibilidad. las hebras con características similares conforman de igual modo la trama y la urdimbre lo que hace que adquieran la misma categoría (Adovasio, 1977). Adovasio (1997) la asimila a la técnica de plegado.

4.2.2. Entramados según el patrón geométrico

Existen numerosas formas de clasificar los tejidos en base a las diferentes variables como son: el grado de apertura, verticalidad u horizontalidad, ritmo de tejido, etc. La distinción por patrón geométrico es otra de las formas de clasificación con la que se pueden agrupar fácilmente los diferentes patrones de tejido.

Tejidos de geometría hexagonal (entrelazados o torsionados)

El origen de objetos realizados con entramados de geometría hexagonal se puede encontrar en antiguas civilizaciones por todo el mundo.

Desde la zona de Madagascar hasta la Amazonía, pasando por Canadá, Mozambique, Ecuador o el Congo se pueden observar tejidos hexagonales utilizados en las distintas culturas con diferentes usos. Son tejidos que se adaptaron a la pesca para el traslado de pescados o para trampas de pescar, en cestas donde se trasladaban alimentos y grano, para accesorios como raquetas de nieve o complementos, entre otras varias utilidades (figura 151) (Gerdes, 2003).

En particular, los tejidos hexagonales pueden encontrarse hasta la actualidad en Asia, en lugares como Laos, Indonesia, Filipinas, China, Japón e India.

En Japón es conocido con la conjunción de dos palabras: “Kago” que significa cesto o tejido y “me” que significa ojos; Kagome. Esta denominación se realizó por los agujeros del tejido que se generan con este patrón⁸.

Johannes Kepler (1619) describió este patrón en su libro “Harmonices Mundi”, en el cual representa la armonía de las formas geométricas. Geométricamente, el tejido hexagonal se compone de triángulos y hexágonos regulares. Dos hexágonos y dos triángulos se alternan alrededor de un vértice.

La triangulación hace que sea un tejido estable y resistente. Según

⁸ Una posibilidad es que de la observación de los panales de abejas haya surgido el tejido hexagonal por lo que también se mantiene el concepto de repetición geométrica y simetría.

Fig. 152 Unidad del tejido triaxial hexagonal
shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/.../16_chapter%208.p Chapter 8 ending and Tensile studies on Triaxial fabrics.

Fig. 154 Modelos de cubos entrelazados según ángulo y dimensión de las fibras.
Tarnai, T. (2006). Baskets. In *Proc. of the IASS-APCS 2006 Int. Symp. New Olympics New Shell and Spatial Structures*. Beijing, China, 2006.(Beijing University of Technology).

número de fibras que se entrelazan se pueden clasificar en biaxiales o triaxiales. Los triaxiales están compuestos por tres capas superpuestas de tejido en un nudo de entrelazado (fig. 152).

Los tejidos de geometría ortogonal

Los tejidos ortogonales también fueron utilizados desde siempre para la constitución de entrelazados a distintas escalas, ya que geométricamente se trata de una solución bidireccional de mayor simplicidad para trabajarlos con fibras.

Frei Otto⁹ realizó varias construcciones suspendidas de madera, de arcos sencillos y geometrías de doble curvatura y mallas ortogonales en el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart (fig. 153).

Fig. 153 Construcción de malla ortogonal de madera. Frei Otto. www.tectonicablog.com (20190906)

4.2.3. Entramados envolventes del cubo y otros poliedros

Tejido ortogonal

Son tejidos generados por una trama simple de dos fibras que se cruzan de forma ortogonal marcando un ritmo continuo de superposición (uno – uno) (fig. 154). Este tipo de tejidos permite variar su ángulo en relación a las aristas que conforman el cubo (fig. 155).

La posibilidad de tejer de modo oblicuo una figura geométrica como es un poliedro, en el caso del cubo, por ejemplo, viene dada por la restricción del ángulo posible.

“La razón es que una fibra no puede contener un vértice del cubo como punto interior. El vértice del cubo sólo puede estar situado en el límite de una fibra. Esta propiedad proporciona un carácter discreto para el ángulo de inclinación” (Tarnai, 2006).

Tarnai (2006) describe las posibilidades de realizar entrelazados según el ángulo de incidencia entre la fibra y el vértice para conformar un cubo, a continuación se citan:

- “Fibras paralelas o perpendiculares a las aristas del cubo
- Fibras con ángulo $\pi/4$ en referencia a los bordes del cubo

Fig. 155 Liotta, S. J. (2012). *Patterns and layering: Japanese spatial culture, nature and architecture*

⁹ Frei Paul Otto (1925 - 2015) arquitecto y profesor Alemán. Desarrolló numerosos proyectos significativos y experimentales con mallas y sistemas constructivos mediante estructuras tensadas buscando la eficacia estructural y espacial.

c b	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57
1	3	4	6	4	3	4	6	4	3	4	6	4	3	4	6	4	3	4	6	4
2	6	6	8	3	12	3	8	6	6	6	8	3	12	3	8	6	6	6	8	3
3	9	4	3	12	3	4	18	4	3	12	3	4	9	4	3	12	3	4	18	4
4	12	3	12	3	16	6	6	3	24	3	6	16	3	12	3	12	3	12	3	3
5	15	4	3	4	6	20	3	4	3	4	30	4	3	4	3	20	6	4	3	4
6	18	6	8	18	6	3	24	3	6	9	8	3	36	3	8	9	6	3	24	3
7	21	4	6	4	3	4	3	28	6	4	6	4	3	4	42	4	3	4	6	4
8	24	3	6	3	24	3	6	6	32	3	12	6	12	6	6	3	48	3	6	6
9	27	4	6	12	3	4	9	4	3	36	3	4	9	4	6	12	3	4	54	4
10	30	6	8	3	6	30	8	6	12	3	40	6	6	3	8	15	6	6	8	3
11	33	4	3	4	6	4	3	4	6	4	6	44	3	4	3	4	3	4	3	4
12	36	3	12	9	16	3	36	3	12	9	6	3	48	3	6	18	12	3	18	6
13	39	4	3	4	3	4	3	4	6	4	3	4	3	52	6	4	3	4	3	4
14	42	6	8	3	12	3	8	42	6	8	3	6	6	56	3	12	3	8	3	3
15	45	4	6	12	3	20	9	4	3	12	15	4	18	4	3	60	3	4	9	4
16	48	3	6	3	12	6	6	3	48	3	6	3	12	3	12	3	64	6	6	6
17	51	4	6	4	3	4	3	4	3	4	6	4	3	4	3	4	6	68	3	4
18	54	6	8	18	12	3	24	6	6	54	8	3	18	3	8	9	6	3	72	3
19	57	4	3	4	3	4	3	4	6	4	3	4	6	4	3	4	6	4	3	76

Fig. 156 Representación de las posibles inclinaciones de b y c para formar el entrelazado del cubo sin que el vértice coincida con el eje de la fibra.

Tabla: número n de tejido cerrado para diferentes valores de b y c

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

c. Fibras con un ángulo diferente a $\pi/4$ o 0."

"Si se considera un cubo $(4;3+)b,c$ (Schläfli) lo cual indica que la geometría tiene 4 vértices en una cara y que en cada vértice se encuentran tres caras, entonces b y c indican la inclinación del cubo en referencia a una trama ortogonal " (Tarnai, 2006).

A partir de esta observación, Tarnai (2006) establece que la relación entre el ángulo de tejido posible y la geometría del cubo puede darse en tres situaciones posibles (fig.156):

1. "b=0 o C=0; b≠C
2. b=C; b≠0
3. b≠C; b≠0; C≠0"

"Los números positivos de b y c al cuadrado determinan el número S, $S = b^2 + c^2$, es la fórmula que establece el número de cuadros de una cara del cubo. Entonces, una fibra puede definirse por la continuación de un cuadro que gira con el borde y le da continuidad " (fig. 156 y 157) (Tarnai, 2006)

Según escriben Tarnai, Kovács, Fowler, & Guest (2012) "las tiras del tipo a tendrán una longitud $4b$, entonces $s(b,0) = 12(b^2+0^2) - 4b=3b$. Para el caso b las tiras cruzan las caras con un ángulo $\pi/4$ con respecto a los vértices, y la longitud de las tiras es tres veces la diagonal del de las caras del cubo, $6b$. La fórmula será: $s(b,c) = 12(b^2+ b^2) - 6b=4b=4c$. Para el caso c, b y c son números primos, el número de tiras será 3, 4 o 6 y la cobertura tendrá simetría D4, D3, D2, con todas las tiras equivalentes."

n indica el número de tiras que envuelven el cubo según b y c (ángulos de inclinación, fig. 157). El análisis de una geometría cerrada como es el cubo permite identificar las normas intrínsecas que relacionan el tejido y la geometría que se busca realizar.

Para otros poliedros

La figura 156 indica el número n de tiras necesarias para envolver un poliedro de dimensiones b y c (Tarnai, 2006)

Mediante un programa informático elaborado específicamente para determinar la relación entre tejido (envolvente) y geometría, se puede

Fig.157 Definición de los parámetros b y c

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

Fig. 158 y 159 Alison Grace Martin, 2016. Esferas construidas con distintos entramados hechas con tiras de bambú

Empalmes reforzados con cinta adhesiva, en los nudos no hay fricción forzada,

www.flickr.com/photos/109333486@N07/25956150750/ (20190907)

www.flickr.com/photos/109333486@N07/25378019944/ (20190907)

observar y determinar el número n de curvas cerradas que se requieren en relación a los valores b y c dados. Se obtuvo una tabla simétrica (fig. 156), lo que indica que b y c no cambian el número de fibras solo la imagen especular (Tarnai, 2006).

Este resultado tiene congruencia con el Teorema de Euler:

$$\text{Caras} + \text{vértices} = \text{aristas} + 2$$

La investigación realizada por Tarnai sobre el estudio de las envolturas admisibles para generar poliedros permite estudiar además otras clases de geometrías utilizando su metodología de trabajo.

Tejidos hexagonales (3,6,3,6; Schläfli)

Compuesto por tres direcciones con un ángulo de inclinación de 60° , conocido en Japón con el nombre Kagome (figura 160 y 161). Para la construcción de un cubo con este tipo de tejido se necesita modificar el patrón geométrico del entramado en los vértices para generar las esquinas del cubo a modo de singularidades como sucede en los conos, por ejemplo.

4.2.4. Entramados envolventes de geometrías desarrollables (simple curvatura) y no desarrollables (sinclásticas)

Como en el caso del cubo, para la constitución de envolventes tejidas de forma ortogonal o hexagonal se necesita conocer las particularidades de la superficie que determinan sus propias leyes.

El cono se define por ser una superficie desarrollable¹⁰, de simple curvatura, que presenta un polo, una singularidad. El entramado requiere una modificación del patrón geométrico o regularidad en el polo. La constitución de entramados de las superficies desarrollables a partir de un plano no presentan alteraciones en el patrón geométrico del entrelazado ya que no tienen puntos singulares.

Para las superficies no desarrollables como las esferas (fig. 158 y 159) y medias esferas que son superficies sinclásticas¹¹ con uno y dos polos, se realizan modificaciones en el ritmo o la geometría que constituye el tejido.

¹⁰ Superficies desarrollable: son aquellas que pueden transformarse en un plano si no se modifican las distancias entre sus puntos. Son casos como las superficies regladas donde la curvatura de Gauss es nula.

¹¹ Se denominan superficies sinclásticas aquellas en donde todos sus puntos existe la misma curvatura.

Fig. 160 Liotta, S. J. (2012). *Patterns and layering: Japanese spatial culture, nature and architecture*

Fig. 161 Cesta entrelazada hexagonal con alteración en las esquinas y en el vértice para conformar un rectángulo Tarnai, T. (2006). *Baskets. In Proc. of the IASS-APCS 2006 Int. Symp. New Olympics New Shell and Spatial Structures. Beijing, China, 2006.* (Beijing University of Technology).

Fig. 162 Vo Trong Nghia, 2015. *Diamond Island Community Hall*
www.votrongnghia.com (20190907)

Con tejidos ortogonales (fig. 162 y 164)

En las construcciones realizadas por Frei Otto se puede observar que este tipo de entramados mantienen su patrón geométrico a pesar de que cambie la curvatura.

Con tejidos hexagonales

“Se deduce que una cesta de kagome ami con 6 pentágonos corresponde a un “Hemisferio” esto se amplió con un cilindro. La superficie cilíndrica tejida puede ser arbitrariamente larga para cualquier orientación de las fibras. Otro importante corolario del teorema de Descartes es que, para un poliedro limitado por hexágonos y pentágonos, donde en cada vértice confluyen 3 bordes, el número de pentágonos es 12. Esta consecuencia, que puede ser considerada como un teorema, es topológica (combinatoria) en la naturaleza y es independiente de la disposición de los pentágonos “(Tarnai, 2006) (fig.151)

El Teorema del poliedro de Euler¹² demuestra la definición anterior. Es posible, por lo tanto, tejer una esfera mediante hexágonos sin deformar el patrón geométrico del tejido, incluyendo 12 pentágonos que estarán rodeados por tres polígonos (Tarnai, 2006) (Tarnai, Kovács, Fowler, & Guest, 2012) (Martín, 2015).

Un entramado formado sólo por hexágonos necesita un cambio en la geometría del tejido para poder dar forma a un cono, una esfera o una semiesfera. Esto se debe a que el hexágono generará un tejido plano que necesita de la composición de geometrías para dar convexidad o concavidad a la geometría buscada, a través de la inclusión de heptágonos y pentágonos. La introducción de un heptágono a la vez que se teje un pentágono no modificará la curvatura del tejido, ya que el heptágono tiene un angular de $-\pi/3$ y el pentágono de $+\pi/3$. En geometrías cerradas, se pueden observar tejidos kagome ami con 12 pentágonos y 12 heptágonos asociados, con independencia del número de hexágonos (Tarnai, 2006) (Tarnai, Kovács, Fowler, & Guest, 2012) (Martín, 2015).

La alteración de los tejidos hexagonales con la presencia de heptágonos y pentágonos podría denominarse singularidades. Estas singularidades están presentes en la naturaleza también, en las estructuras moleculares.

¹² Leonhard Euler en 1750 definió el teorema para poliedros que relaciona las aristas, vértices y caras de un poliedro convexo, es una relación constante entre estos términos que no sufre alteraciones por rotación de dichos poliedros u otras modificaciones.

*Fig. 164 Anna Heringer, 2016. Three Houses para la Bienal de bambú 2016, China.
Autor de la fotografía: Jenny Ji
Architectural Review*

La presencia del pentágono otorga una curvatura convexa positiva, mientras que el heptágono una curvatura negativa o cóncava. El Teorema de los Polígonos de Descartes establece que el total de defectos angulares de un poliedro convexo equivalente a una esfera es $4\pi = 720^\circ$. Para conseguir estructuras hyper es necesario agregar mas cantidad de tejido hexagonal, pero para realizar geometrías cerradas es necesario introducir pentágonos que dan curvatura al tejido (Martin, 2015).

Los polos son puntos particulares de una geometría desde los cuales un tejido comienza a formarse o se finaliza (fig. 163). Dependerán del tipo de geometría ya que no todas presentan polos en su estructura de conformación. Las singularidades indican qué tipo de polo es.

El Teorema Euler Poincaré ¹³ establece el número de polos que se necesitan según la geometría para que pueda construirse. El toro o la botella de Klein, por ejemplo, no se requiere polo para su conformación. La esfera por el contrario tiene dos polos (Petit, 1979).

4.2.5. Relación entre la curvatura y la distancia de las fibras de un tejido

La relación que existe entre la curvatura de una fibra y la distancia entre las fibras que forman el tejido, desde el punto de vista de análisis geométrico, viene dada por dos aspectos:

- El polo y la singularidad de la geometría (fig. 153) (si es que la geometría tiene)
- La flexión admisible de la fibra en relación al corte y la especie de bambú. Determinado por la flecha máxima.

$$f. \max. = (5/384) q (L^4/EI) \text{ para carga continua}$$

$$f. \max = (1/48) (PL^3/EI) \text{ para carga puntual}$$

Estos factores determinarán la frecuencia del patrón de tejido ya que la existencia de un polo en una geometría establece un punto complejo que "ordena" el entramado a su alrededor y las características propias de las fibras con las que se está generando la forma establecerán concretamente el límite admisible de curvatura, así como las propias dimensiones del corte que marcarán una distancia determinada entre

Fig. 163 Singularidades positivas y polos.
Petit, J.-P. (1979). *Le topologi-con. Belin.*

¹³ Característica de Euler - Poincaré determina un invariante topológico que se utiliza para describir una clase de espacios topológicos (estructura matemática que define convergencia, conectividad, vecindad, etc, usando subconjuntos que cumplen propiedades concretas). <https://ncatlab.org/nlab/show/Euler+characteristic>

Fig. 165 Estudio gráfico de tejidos
Liotta, S. J. (2012). *Patterns and layering: Japanese spatial culture, nature and architecture*

fibras dando ritmo modular al tejido (fig. 165).

“El tejido muestra un potencial considerable para el diseño y construcción de superficies complejas doblemente curvadas, debido a las características de flexión específicas del material. Las estructuras de tejido se acomodan a las variaciones naturales de la curvatura y de hecho ganan rigidez morfológica cuando se aplican en geometrías curvas. Otra característica fundamental de esta técnica es su capacidad para establecer sistemas de construcción increíblemente resistentes y complejos a través del uso de materia prima barata, desde las raíces hasta el césped, de caña a sauce “(Naboni & Breseghello, 2015).

4.3. LA NOMENCLATURA EN LA IDENTIFICACIÓN DE ENTRAMADOS

4.3.1. Símbolo de Schläfli

Es una notación simple que se utiliza para identificar el ritmo regular de un tejido o teselación. Viene dado por la forma $(p,q,r,\dots,w)$. Se designan los lados de la geometría del tejido y esto se identifica directamente con la geometría utilizada y su repetición o ritmo.

Para los tejidos hexagonales se designan como el mosaico de Arquímedes plano definido por el símbolo Schläfli $(3,6,3,6)$, que establecen el ritmo geométrico del tejido en los vértices: un vértice rodeado por un triángulo (3), rodeado por un hexágono (6), por otro triángulo (3), y por otro hexágono (6). La denominación $(6,3)$ indica a su vez que hay 3 hexágonos alrededor de un centro (Ternai, 2006) (Martin, 2015). Para los tejidos ortogonales se escribirá: $(4,4,4,4)$. identificando que cada vértice está rodeado de figuras de 4 lados y el ritmo es repetitivo sin cambios. La denominación $(4,4)$ indica que hay 4 figuras de 4 lados, cuadrados, alrededor de un centro.

Se utiliza también para definir un polígono (p,q) , siendo p es el número de lados de una cara y q indica cuántas caras se juntan en un vértice.

4.3.2. Notación de los tejidos biaxiales

																rows	row			block	amount
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	1	10001000	A	0	
1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	8	2	11000001	B	7	
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	8	3	11100011	C	6	
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	4	4	01110111	D	1	
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	5	10001000	A	0	
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	8	6	00011100	B	3	
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	8	7	00111110	C	2	
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	8	8	01110111	D	1	
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4					
1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	8	block	EFGFEFGF			
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	8	amount	01254521			
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	4					
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4					
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	8					
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	8					
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	4					
columns	8	8	8	8	8	4	8	4	8	4	8	8	8	8	8						

Fig. 168 Períodos binarios de tejidos biaxiales ortogonales.
Griswold R.E. (2004). Patterns, R. I. Analysis of Weave Structures, Part 1: Introduction. Department of Computer Science, The University of Arizona. Tucson, Arizona

Indica el ritmo de los cruces de un tejido de la forma $a/b/s$. Siendo a el número de cruces por arriba (cuántas veces pasa por arriba de otra fibra), b es el número de veces que pasa por debajo y s es la rotación del tejido ($90^\circ = 1$; $-90^\circ = -1$) (fig.156).

“Por ejemplo, $2/2/1$ y $2/2/-1$ en la figura 2 se define un giro de 90° de diferencia en exactamente la misma versión de la estructura de teselación. Del mismo modo, $3/1/1$ y $-1/3/1$ definen exactamente la misma estructura cruzada de tejidos” (figura 165) (Akleman, Chen, Chen, Xing, & Gross, 2011).

4.3.3. Rotación de las celdas

El vacío de un patrón de tejido se puede designar como “celda”. En cada celda se identifica la rotación de las fibras para su constitución (fig. 167). Poniendo una mano en uno de los vértices se puede observar la dirección del giro de las fibras del tejido, que siempre son contrarias a un lado y a otro de las celdas. Se designa colocando si el giro es a la izquierda o hacia la derecha y facilita la comprensión de la superposición de tramas y urdimbres (kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf). En los tejidos triaxiales como kagome, en los que hexágonos se alternan con triángulos, entre ellos la dirección del giro siempre es opuesta. Si el hexágono, por ejemplo, que se puede designar como la celda central, gira hacia la derecha entonces los triángulos girarán a la izquierda, y al contrario será en el siguiente (kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf).

4.3.4. Períodos binarios en patrones biaxiales

Para representar el ritmo de los entramados biaxiales se puede utilizar el sistema binario. Representa cuál es la fibra, trama o urdimbre, que está arriba en el tejido. Dándole valores 1 y 0 a la trama y a la urdimbre (fig. 168). Sobre esta primera representación de un tejido se pueden obtener datos concretos como son las repeticiones de bloque designando con letras las filas o columnas para identificar el ritmo de estas, o la permutación (desde la izquierda o desde la derecha) donde se evalúa numéricamente la repetición circular o con un 0 cuando no hay cambios (Griswold, 2004).

Fig. 166 Tejidos biaxiales notación

Akleman, E., Chen, J., Chen, Y., Xing, Q., & Gross, J. L. (2011). Cyclic twill-woven objects. *Computers & Graphics*, 35(3), 623–631.

Fig. 167 Rotación de celdas en tejidos ortogonales y hexagonales

kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf

Fig. 169 Wang Wen - chih., *Woven Sky*. Australia 2013-2014.
Ejemplo de entramado irregular y por detrás torsionado con bambú y pino.
www.caveurban.com (20180407)
Juzzo_Setup_05

4.4. ESTUDIO GRÁFICO DE PATRONES DE ENTRAMADO

Para la comprensión de los patrones de los entramados mas utilizados y para obtener información concreta se realizó el estudio gráfico de 17 entramados (basados en una selección realizada por Hidalgo, 2003). La selección fue realizada dando prioridad a los entrelazados (fig. 169) y torsionados mas populares internacionalmente y que pueden llegar a tener interés en el ámbito de la arquitectura tejida. Es un estudio de proporciones de datos lo que permite valorar el patrón de tejido independientemente de la escala de trabajo. Se estudiaron 14 entrelazados (ortogonales y hexagonales) y 3 torsionados tipo. Se identificaron: el ritmo de cruce, el ritmo del tejido y en base a la superficie de la muestra (siempre es la misma para los 17 estudios) se analizaron: el porcentaje de superficie vacía y tejida, el número de capas superpuestas y la superficie de fricción (midiendo gráficamente el área de contacto y el número de capas de fibras en contacto), los ángulos del tejido y la geometría generativa del entramado. Además se analiza la rotación de celdas, los nudos de entramado y el sistema binario del tejido.

Estudio comparativo del análisis gráfico de entrelazados y torsionados, datos obtenidos.

Descripción

Se realizó el estudio de 14 entrelazados y 3 torsionados, los mas significativos y que a la vez permitieran otorgar información variada por su diversidad basado en una selección realizada por Hidalgo (2003) (Capítulo 4 - Entramados).

El análisis gráfico de 17 patrones de entramado dio como resultado una serie de datos referentes a los vacíos y llenos del tejido, a la superficie de fricción, al número de capas superpuestas en los nudos de entrelazado, rotación de celdas, etc.

Metodología de cálculo para la obtención de los porcentajes:

Se realizaron los dibujos mediante CAD y el cómputo de superficies con el mismo programa. Se identificaron los nudos de entramado y las capas superpuestas de fibras en los 17 tejidos dibujados. Todas las muestras de tejidos dibujadas tienen la misma dimensión y se le dio a cada una el porcentaje de 100%. A partir de ese dato se obtuvieron:

-Se identificó el ancho de fibra del tejido 1 como punto de partida para poder valorar porcentualmente los anchos de fibra de los 16 tejidos restantes. Se consideró la fibra del tejido 1 como el 100% desde el cual se sacaron los porcentajes de ancho mayor o menor de fibra.

- La superficie tejida: Se obtuvo mediante la herramienta de CAD calculando el área tejida sobre el dibujo realizado. El porcentaje de la superficie tejida se obtuvo considerando que el 100% es el área de la muestra total: el área tejida por el 100% y realizando la división entre el área total de la muestra.

_ La superficie vacía: Se obtuvo haciendo la diferencia entre el 100% de la superficie de la muestra y el porcentaje de superficie tejida obtenido.

- La superficie de fricción de la muestra: Se obtuvo sumando las áreas de cruce de fibras mediante la herramienta de CAD y multiplicando por las capas que se superponen. Para obtener el porcentaje se realizó consideró que el 100% es el área de la muestra total: la superficie de fricción por el 100% y realizando la división entre el área total de la muestra.

En base a el porcentaje de fricción obtenido se estableció una escala de valores porcentuales que permitió ordenar los resultados. Los índices de rozamiento se ordenaron en: -40% bajo, 40-50% medio, +50% alto.

Fig. 170 Análisis gráfico del patrón de tejido hexagonal
Elaboración propia

Fig. 171 Análisis gráfico del patrón de tejido ortogonal
Elaboración propia

ENTRAMADO 1
Tejido hexagonal
(kagome ami)

Ritmo de cruce: (1/1/1)
Ritmo de tejido: (3,6,3,6)

TEJIDO

Direcciones de las fibras: Diagonales y horizontales.
Ángulos: 60º y 120º
Tipo de retícula: Hexagonal

Longitud del vacío por unidad de área (Mesnil, Douthe, Baverel, & Léger, 2017):
En base a la célula básica: $La = \sqrt{3}/1 = 1,71$
Número de nudos por unidad de área: $\sqrt{3}/2l = 0,86$

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida : 46,7%
Superficie vacía : 53,3%
Superficie de nudos de entrelazado:
-2 capas 23,8%

MATERIAL

Espesor del material: dependerá de la elección del corte
Generación de curvatura: mediante vapor de agua, calor y trabajando con un bambú joven

FRICCIÓN - ROZAMIENTO

(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 23,8%
capas superpuestas: 2

Indice de rozamiento según % de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

Fig. 172 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Fibras

Superficie de fricción

Número de capas superpuestas

ENTRAMADO 2
Tejido ortogonal
(Yotsume ami)

Ritmo de cruce: (1/1/1)
Ritmo de tejido: (4,4,4,4)

TEJIDO
Direcciones de las fibras: Verticales y horizontales.
Ángulos: 90º
Tipo de retícula: Ortogonal

Número de nudos por unidad de área: cuadrado de lado 1
(Mesnil, Douthe, Baverel, & Léger, 2017)

SUPERFICIES
Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 75,5%
Superficie vacía : 24,5%
Superficie de nudos de entrelazado:
-2 capas 49,7%

MATERIAL
Espesor del material: dependerá de la elección del corte
Generación de curvatura: mediante vapor de agua, calor y trabajando con un bambú joven

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 49,7%
capas superpuestas: 2

Índice de rozamiento según % de fricción
bajo **medio** alto
-40% **40 - 50%** +50%

Fig. 173 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Superficie de fricción

Número de capas superpuestas

Períodos / sistema binario
fibras arriba: 0
fibras arriba:1

ENTRELAZADO 3
(Yotsume ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 45,2%
Superficie vacía: 54,8%
Superficie de nudos:
-2 capas 13,2%

MATERIAL

Ancho de la fibra 30% menos
que tejido ortogonal 1

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y horizontales
Ángulos: 90°
Tipo de retícula: ortogonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 13,2%
2 capas superpuestas

Indice de rozamiento según %
de fricción
bajo medio alto
-40% 40-50% +50%

Fig. 174 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Superficie de fricción

Número de capas superpuestas

Períodos / sistema binario
fibras arriba: 0
fibras arriba:1

Vacios

ENTRELAZADO 4
(yotsume ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 85,4%
Superficie vacía: 14,6%
Superficie de nudos:
-4 capas: 64,5%
-2 capas: 14,7%

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 79,2%
Superficie total de fricción:
79,2%

Índice de rozamiento según %
de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40- 50%	+50%

SOBRE EL TEJIDO

Tipo de retícula: ortogonal - diagonal

Fig. 175 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Fibras

Número de capas superpuestas

Superficie de fricción

ENTRELAZADO 5
(Yotsume ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 84,6%
Superficie vacía: 15,4%
Superficie de nudos:
-4 capas: 142%
-2 capas : 11,8%

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 153,8%

Indice de rozamiento según %
de fricción
bajo medio alto
-40% 40-50% +50%

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales, horizontales y diagonales
Ángulos: 90º - 45º
Tipo de retícula: ortogonal

Fig. 176 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Fibras

Fibras

Número de capas superpuestas

Superficie de fricción

ENTRELAZADO 6
(Yotsume ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 54,5%
Superficie vacía: 45,4%
Superficie de nudos:
-3 capas: 15,2%
-2 capas: 6%

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 21,2%
Superficie total de fricción:
21,2%
2 capas superpuestas

Indice de rozamiento según %
de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y horizontales
Ángulos: 90º
Tipo de retícula: ortogonal

Fig. 177 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Fibras

Superposición de fibras

Superficie de fricción

ENTRELAZADO 7
(Yotsume ami)

SUPERFICIES
Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 94,1%
Superficie vacía: 5,9%
Superficie de nudos:
-2 capas : 107,9%

MATERIAL
Ancho de la fibra 15% menos
que tejido 1

SOBRE EL TEJIDO
Dirección de las fibras: verticales y horizontales
Ángulos: 90°
Tipo de retícula: ortogonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 107%
Superficie total de fricción:
107,9%
2 capas superpuestas

Índice de rozamiento según %
de fricción
bajo medio alto
-40% 40-50% +50%

Fig. 178 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Períodos / sistema binario

Nudos superpuestos

Superficie de fricción

ENTRELAZADO 8
(Yotsume ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 98,3%
Superficie vacía: 1,7%
Superficie de nudos:
-2 capas : 135,7%

MATERIAL
Ancho de la fibra 14% menos
que el tejido 1

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y horizontales
Ángulos: 90°
Tipo de retícula: ortogonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 135,7%
Superficie total de fricción:
135,7%
2 capas superpuestas

Índice de rozamiento según %
de fricción
bajo medio alto
-40% 40-50% +50%

Fig. 179 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Períodos / sistema binario

Nudos superpuestos

Fricción

Vacios

ENTRELAZADO 9
(Yotsume ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 76,5%
Superficie vacía: 23,5%
Superficie de nudos:
-3 capas: 41,6%
-2 capas: 8,9%

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 50,5%
Superficie total de fricción:
50,5%
2 - 3 capas superpuestas

Índice de rozamiento según %
de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y diagonales
Ángulos: 30°, 90°
Tipo de retícula: hexagonal

Fig. 180 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Fibras

Nudos superpuestos

Fricción

**ENTRELAZADO 10
IRREGULAR**
(Midare ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 36,9%
Superficie vacía: 63,1%
Superficie de nudos:
-3 capas: 5,4%
-2 capas: 7,1%

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 12,5%
Superficie total de fricción:
12,5%
capas superpuestas 2 - 3

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y diagonales
Ángulos: 30°, 60°, 70°
Tipo de retícula: hexagonal

Indice de rozamiento según %
de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

Fig. 181 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Nudos superpuestos

Fricción

ENTRELAZADO 11
(Yotsume ami)

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales, horizontales y diagonales
Ángulos: 45°, 90°
Tipo de retícula: hexagonal

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 49,2%
Superficie vacía: 50,8%
Superficie de nudos:
-2 capas: 42,3%

MATERIAL

Ancho de la fibra 42% menor al del tejido 1

FRICCIÓN - ROZAMIENTO

(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 42,3%
Superficie total de fricción:
42,3%
2 - 3 capas superpuestas

Índice de rozamiento según % de fricción
bajo **medio** alto
-40% **40-50%** +50%

Fig. 182 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Nudos superpuestos

Fricción

ENTRELAZADO 12
(Tessen ami)
(Mad weaving)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 92,5%
Superficie vacía: 7,5%
Superficie de nudos:
-3 capas: 298%

MATERIAL

Ancho de la fibra igual al del tejido 1

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: diagonales
Ángulos: 60°
Tipo de retícula: hexagonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO

(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 298 %
Superficie total de fricción: 99,4%
3 capas superpuestas

Índice de rozamiento según % de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

Fig. 183 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Fibras

Nudos superpuestos

Fricción

ENTRELAZADO 13
(Tessen ami)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 92,2%
Superficie vacía: 7,8%
Superficie de nudos:
-3 capas: 36,2%
-2 capas: 109,3%

MATERIAL

Ancho de la fibra igual al del tejido 1

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y diagonales
Ángulos: 60º
Tipo de retícula: hexagonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO (sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 145%
Superficie total de fricción: 145,5%
2 - 3 capas superpuestas

Índice de rozamiento según % de fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

Fig. 184 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Nudos superpuestos

Fricción

ENTRELAZADO 14
(Yotsume ami)

SUPERFICIES
Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 97,3%
Superficie vacía: 2,7%
Superficie de nudos:
-2 capas: 96,5%

MATERIAL
Ancho de la fibra: entre el 14%
y el 60% menos que las fibras
del tejido 1

SOBRE EL TEJIDO
Dirección de las fibras: verticales y horizontales
Ángulos: 90º
Tipo de retícula: ortogonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 96,5%
Superficie total de fricción: 96,5%
2 capas superpuestas

Indice de rozamiento según % de fricción
bajo medio alto
-40% 40-50% +50%

Fig. 185 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Fibras

Fibras

Nudos superpuestos

Fricción

TORSIONADO 15
(AJIRO)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 81,6%
Superficie vacía: 18,4%
Superficie de nudos:
-3 capas: 127,8%
-2 capas : 78,1%

MATERIAL

Ancho de la fibra 65% menos
que el tejido 1

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y diagonales
Ángulos: 18°
Tipo de retícula: ortogonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 206%
Superficie total de fricción: 201,1%
2 capas superpuestas

Índice de rozamiento según % de
fricción

bajo	medio	alto
-40%	40-50%	+50%

Fig. 186 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Superposición de nudos

Superficie de contacto: fricción

TORSIONADO 16 (AJIRO)

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: verticales y horizontales
Ángulos: 90º
Tipo de retícula: ortogonal

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 62,7%
Superficie vacía: 37,3%
Superficie de nudos:
-2 capas : 25,8%

MATERIAL

Ancho de la fibra 65% menos
que el del tejido 1

FRICCIÓN - ROZAMIENTO
(sobre la muestra)

Porcentaje de fricción: 25%
Superficie total de fricción:
25,8%
2 capas superpuestas

Indice de rozamiento según %
de fricción
bajo medio alto
-40% 40-50% +50%

Fig. 187 Elaboración propia

Fibras

Fibras

Fibras

Superposición de nudos

Superficie de contacto: fricción

TORSIONADO 17
(AJIRO)

SUPERFICIES

Superficie de la muestra: 100%
Superficie tejida: 78,5%
Superficie vacía: 21,5%
Superficie de nudos:
-3 capas: 44,9%
-2 capas : 9,9%

MATERIAL

Ancho de la fibra 57% menos
que las del tejido 1

SOBRE EL TEJIDO

Dirección de las fibras: horizontales y diagonales
Ángulos: 45°
Tipo de retícula: ortogonal - diagonal

FRICCIÓN - ROZAMIENTO

(sobre la muestra)
Porcentaje de fricción: 50%
Superficie total de fricción:
44,9%
2 - 3 capas superpuestas

Indice de rozamiento según %
de fricción
bajo **medio** alto
-40% **40-50%** +50%

Fig. 188 *Elaboración propia*

Fibras

Fibras

Fibras

Superposición de nudos

Superficie de contacto: fricción

Observaciones

Como resumen se exponen en la tabla fig. 189 los datos obtenidos que permiten identificarlos y compararlos.

La superficie de fricción:

Se puede observar que en 6 tejidos de los 17 la superficie de fricción es de mas del 50% del tejido, esto tiene que ver con el ancho de la fibra utilizada y con el número de capas superpuestas (Biaxial, triaxial, etc.).

Superficie tejida / Superficie vacía:

11 de los 17 entramados estudiados gráficamente tienen un porcentaje de superficie tejida mayor al 50% del total de la probeta. Esta información va directamente relacionada con el corte utilizado de bambú en este caso concreto se altera también la densidad del entramado.

Número de capas superpuestas:

Este dato tiene que ver con el patrón de entramado por lo que no se modificará al cambiar el tipo de corte ni la densidad de fibras. En 7 de los 17 tejidos estudiados en sus nudos de entramado se cruzan dos fibras, a pesar de que algunos de ellos son tejidos biaxiales y otros triaxiales.

		Entrelazados														Torsionados		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Número de capas en nudo	+3				●	●					●							
	3						●			●		●	●			●	●	●
	2	●	●	●				●	●					●	●			
Superficie vacía %	+ 50%			●							●							
	40/50%	●				●	●					●						
	- 40%		●		●			●	●	●			●	●	●	●	●	●
Superficie tejida %	+ 50%		●		●			●	●	●			●	●	●	●	●	●
	40/50%	●				●	●					●						
	- 40%			●							●							
Superficie de fricción %	+ 50%				●	●							●	●	●	●		
	40/50%						●	●	●	●		●					●	
	- 40%	●	●	●							●							●

Fig. 189. Tabla resumen de datos analizados en el estudio gráfico de 17 patrones de tejido a partir de la selección de tipologías realizada por Hidalgo (2003).

Tabla con encabezado numerado de 1 a 17 en referencia a los patrones de tejido de igual modo numerados en el análisis gráfico.

Muestras de los patrones estudiados (a la derecha de esta hoja, página 215) numerados de 1 a 17.

Elaboración propia

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

Fig. 192 Wen- Chih Wang, 2013-2014. Tejidos de borde en la construcción realizada por un entrelazado irregular de bambú Woven Sky, Australia. Detalle de borde
<https://www.caveurban.com/wang-wen-chih1-2> Kai_setup_97 (20190907)

4.5. LA ALTERACIÓN DE LOS PATRONES DE ENTRELAZADO EN ZONAS CONCRETAS DE LAS SUPERFICIES GEOMÉTRICAS

4.5.1. El cambio del tejido horizontal al vertical

Tejidos de base

Cuando se trabaja con tejidos donde se pasa de una superficie horizontal a una superficie vertical existe una correlación de dependencia entre las dos direcciones y el entramado.

En los entramados que tienen esta condición, por lo general, se comienza con el tejido horizontal (figura 190), por lo tanto la elección de este condicionará el tejido vertical.

Para tejidos ortogonales hay diferentes opciones para continuar con las superficies verticales como generar un entrelazado hexagonal abierto a partir de las fibras que suben verticales tejiéndolas en diagonal formando una estructura romboidal, incluyendo una latilla horizontal para rigidizar el tejido. Cuando la superficie tejida es cerrada se utilizan variantes de torsionado o combinaciones de torsionados y tejidos ortogonales.

Cuando el tejido es hexagonal inevitablemente el paso de la horizontal a la vertical se produce mediante formas pentagonales que admiten el cambio de sentido y el ángulo necesario para hacerlo (Tarnai, 2006).

El inicio de la base puede hacerse de forma radial, utilizando un grupo de fibras torsionadas entre ellas conformando una cuerda o puede hacerse con una fibra simple. Usualmente estas fibras que conforman la trama que entreteje se continúan conformando las verticales (Rajan, Iyer, Pandya, 1986).

4.5.2. El tejido de borde

Los tejidos requieren un borde donde se acumulan tensiones que rigidiza y ayuda a mantener el tejido unido.

Las tipologías de borde (fig. 192) se pueden dividir en tres tipos diferentes: El primero es el que se realiza utilizando las fibras de trama, que entrelazándolas generan un cierre (fig. 191). El segundo y el tercer tipo incluyen un nuevo elemento de borde (fig. 191). La segunda

Fig. 190 Tejidos de base

Fig. 191 Tejidos de borde opción 1, 2 y 3

Rajan M.P., Iyer N. & Pandya Ghanshyam, (2004). *Bamboo and Cane Crafts of Northeast India*. India: National Institute of Design Editor.

tipología de borde es en la que se coloca una tira flexible y se cose con el tejido mismo o con una nueva fibra que suele ser de caña común, ratán o una tira de la corteza del bambú por su facilidad de atado. Como tercera opción el borde se define mediante dos piezas a modo de “sándwich” que abraza por los dos lados el tejido dejando en medio y atado mediante una costura (Rajan, Iyer & Ghanshyam, 2004).

4.5.3. Tejidos de esquina

Las esquinas son los encuentros entre caras distintas de una geometría y en muchos casos se generan refuerzos en esos puntos (fig. 193). La esquina también se forma por el cambio de geometría (fig. 194).

También en algunas ocasiones se requiere un refuerzo de esquina mediante una nueva latilla rígida que se entreteje a la superficie.

“Si se corta y se quitan $\pi/3$ del patrón de kagome, entonces las dos líneas medias coinciden. De esta forma se obtiene un cono donde, debido a la simetría rotacional de kagome, todas las líneas del patrón irán a través de la línea media sin problemas. Con esta operación, el hexágono se convierte en un pentágono en el vértice del cono. La discreta curvatura en un punto (en el vértice del cono) se define de una manera que es proporcional a la deficiencia angular (ahora $\pi/3$). Las líneas, que eran rectas en el plano, ahora son geodésicas en la superficie del cono. Por lo tanto, el patrón de kagome en el cono puede ser realizado por tejido de hebras” (Tarnai, 2006).

4.6. NUDOS DE ENTRAMADO

Definición de nudo

Se puede definir el nudo en el campo de la arquitectura como la unión entre dos elementos o sistemas tensionados y desde el punto de vista estructural sin posibilidad de admitir resistencia a compresión, conformando un tejido rígido (Wigglesworth, 2010).

En los nudos de entramado las fuerzas confluyen en la dirección X, Y, Z, y se crea una estructura de interdependencia en donde la tensión de un eje influye en los otros. La tensión se ejerce desde las fibras

Fig. 193 Tejidos de esquina
Rajan M.P., Iyer N. & Pandya Ghanshyam, (2004). *Bamboo and Cane Crafts of Northeast India*. India: National Institute of Design Editor.

fig. 194 Cambio de geometría en vértices de esquina
Tarnai, T. (2006). *Baskets*. In *Proc. of the IASS-APCS 2006 Int. Symp. New Olympics New Shell and Spatial Structures*. Beijing, China, 2006. (Beijing University of Technology).

Fig. 195 Estudio de los nudos de entramado.

Muslimin, R. (2010). Learning from weaving for digital fabrication in architecture. *Leonardo*, 43(4), 340-349.

fig. 196 Fricción estática y fricción dinámica en diferentes fibras Cuadro re dibujado.

Moorthy, R. R., & Kandhavadiu, P. (2015). Surface Friction Characteristics of Woven Fabrics with Nonconventional Fibers and their Blends. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 9(3).

traccionadas y su resistencia dependerá del material. La densidad del tejido será también un factor de importancia en la estabilidad del nudo a fricción.

Ciertas fibras mas flexibles son capaces de reflejar la tensión en el momento en que se realiza el entramado, es el caso de fibras mayoritariamente utilizadas para conformar tramas de tejidos que requieren un material mas elástico que admita curvaturas a escala del tejido (fig. 195) (Muslimin, 2010).

4.6.1. Coeficiente de fricción entre fibras del nudo de entramado

El Coeficiente de rozamiento o de fricción (μ)¹⁴ indica la oposición al deslizamiento que ofrece un material en contacto con otro.

$$\text{Coeficiente de fricción} = \mu = F_u / N$$

Moorthy y Kandhavativu (2015)¹⁵ analizaron comparativamente la fricción de diferentes fibras que componen textiles, entre ellas las fibras de bambú. Realizaron, además, una comparativa de los resultados obtenidos en relación a la fricción entre fibras para textiles con fibras planas, con 1/3 de torsión y con 2/2 de torsión (fig. 196).

Se puede observar el incremento de fricción en las fibras torsionadas que conforman el textil frente a las fibras planas (cuadro de Moorthy y Kandhavativu (2015) fig. 196).

Como conclusión indican que:

“La observación muestra que las superficies rugosas de los textiles se ven afectadas significativamente por el tipo de tejido y la densidad de la trama. Los tejidos planos del textil muestran bajo índice de fricción que puede ser debido a la compacidad del tejido. La torsión de 1/3 de tejido tiene mayor fricción que el tejido plano y que la torsión 2/2. La relativa pérdida de estructura en la torsión de 1/3 causa un incremento en la fricción de las fibras. Los huecos

¹⁴ Es una propiedad del material, intrínseca, y adimensional.

¹⁵ Investigación realizada en Department of Fashion Technology PSG College of Technology Coimbatore, Taminladu, India. “El coeficiente de fricción en esta investigación se midió de acuerdo con el comprobador informático de fricción ASTM D1894 usado de forma estandarizada exclusivamente para la caracterización de fricción en fibras, hilados, tejidos, composites y otras técnicas textiles” (Moorthy & Kandhavativu, 2015)

Fig. 197

Fig. 198

Fig. 199

Fig. 200

Fig. 201

Fig. 197 representación gráfica de tejido ortogonal y las tensiones a las que son sometidas las fibras.

Fig.198 Representación gráfica de tejido ortogonal con las tensiones en las fibras y fuerzas normales a compresión en los nudos de entramado.

Fig. 199 Representación gráfica de tejido ortogonal con la un paralelismo a las estructuras de barras y cables, donde se definen planos ortogonales virtuales que se generan.

Fig. 200 y 201 Representación de tejidos hexagonales, las tensiones en las fibras y los planos virtuales que se generan.

Elaboración propia

entre las tramas se incrementan a medida que el tejido se modifica de plano a torsionado, dándole mayor o menor picos en el tejido textil, que incrementan la rugosidad de la superficie.”(Moorthy & Kandhavativu, 2015)

El equilibrio de tensiones en los entramados

Las fibras o latillas se consideran en los tejidos elementos pasantes de gran dimensión, es por ello que la alteración o el cambio de tensión en uno de los puntos afecta al conjunto (fig. 197 y 200).

Al considerar el nudo de entramado como el punto de cruce de dos o mas fibras y tomando en consideración la ecuación del coeficiente de rozamiento ya citada se puede definir que:

$$F_u = \mu \cdot N$$

Fuerza de rozamiento: Coeficiente de rozamiento del material . La fuerza normal

De la cual se puede deducir que, como en una estructura de barras y cables, al aumentar la fuerza normal al plano N aumenta el rozamiento en el nudo y en consecuencia la fuerza de rozamiento, rigidizando el nudo de entramado (fig. 198).

Las tracciones a las que son sometidas las fibras en uno de los planos (en uno de sus ejes) alteran la estabilidad en el plano ortogonal (planos virtuales, fig. 199 y 201), con lo cual se desestabiliza el nudo también, que se ubica en el cruce entre los dos planos virtuales de trabajo que se generan. Se puede decir que son estructuras en equilibrio que se deben compensar entre las tensiones de tracción de las fibras y compresiones que se generan en los nudos por esas tensiones.

Los entramados presentan también efuerzas torsionales, añadido a las fuerzas normales. Las tramas y urdimbres, el cruce que se produce entre fibras generando el nudo de entramado, crean torsiones, que se suma a la condición de la superficie. Si la superficie es alabeada aumenta el efecto torsional sensiblemente, aumentando la capacidad de rigidez del conjunto.

4.6.2. Los nudos de entramado y el corte de la fibra

Fricción entre fibras de bambú

Fig. 202 David Garcia Studio, Map Architects, 2009. Empalme de tiras de bambú en la construcción tejida Weaving Pavilion, China.
www.davidgarciastudio.blogspot.com.es/2009/04/weaving-project.html (20190905)

Las cuerdas utilizadas comúnmente en los puertos para el amarre de barcos necesitaban resistencia al rozamiento y fricción por la presencia de piedras y agua que generaban el desgaste. Las cuerdas de bambú, de gran resistencia a los esfuerzos tracción en la dirección de sus fibras, resultaron ser las más adecuadas para este uso (Hidalgo, 2003) (Needham, Wang & Lu, 1971).

La configuración estratégica de estas cuerdas hacía que funcionaran aún mejor en el momento de ser traccionadas, aumentando el rozamiento interno de las latillas cuando entraban en tensión, además de que al trabajar con dos tipos de corte de fibras bien diferentes cada una ejerce una función al traccionarse: las latillas interiores al ser más blandas y flexibles (cortes de la cara interior del bambú) quedaban atrapadas y ajustadas por las exteriores (cortes de la cara exterior del bambú). Las fibras exteriores se cierran mas y cubren el interior.

La necesidad de multiplicar capas en algunas partes del tejido para dar estabilidad: Hay partes donde las geometrías requieren una modificación del entramado para reforzar y dar respuesta a tensiones mayores, como pueden ser los bordes o límites de un entramado, las esquinas o los cambios bruscos de curvatura.

Los empalmes, que son la superposición de las latillas para dar continuidad al tejido (fig. 202), será también un punto de fricción: El solape de fibras para dar continuidad a un entramado ata de alguna manera la nueva fibra aumentando la fricción y generando nuevos nudos de entramado con mayor cantidad de capas superpuestas.

4.6.3. Los nudos de entramado y la geometría de corte

Las fibras para realizar entramados pueden tener sección curva o plana, según sea el corte que se utiliza. Estas variantes se diferenciarán en el grado de rozamiento (la superficie de fricción será diferente) y en la posibilidad de realizar curvaturas que irá ligada al momento de inercia de la pieza, además del grado de flexibilidad que dependerá también de la geometría propia del corte.

Fricción mecánica

El grado de fricción o rozamiento entre dos superficies sólidas que están en contacto dependerá de la rugosidad de ellas y de los materiales involucrados.

Fibre	Yarn speed, m/s	T_1 , cN			
		2	6	10	15
Flax	0.05	0.23	0.28	0.30	0.30
	0.10	0.24	0.29	0.31	0.31
	0.15	0.25	0.32	0.34	0.33
Bamboo	0.05	0.14	0.20	0.22	0.18
	0.10	0.15	0.20	0.23	0.19
	0.15	0.17	0.21	0.23	0.21
Flax+Bamboo	0.05	0.21	0.22	0.23	0.20
	0.10	0.21	0.23	0.23	0.21
	0.15	0.22	0.24	0.25	0.23
Cotton+Sea Cell	0.05	0.15	0.19	0.21	0.17
	0.10	0.17	0.20	0.23	0.18
	0.15	0.19	0.21	0.23	0.20
Soy	0.05	0.13	0.17	0.19	0.17
	0.10	0.13	0.18	0.20	0.18
	0.15	0.15	0.19	0.22	0.19

Fibre	Diameter of friction body, m	T_1 , cN			
		2	6	10	15
Flax	0.002	0.25	0.32	0.34	0.33
	0.006	0.26	0.27	0.29	0.29
	0.010	0.31	0.32	0.34	0.29
Bamboo	0.002	0.17	0.21	0.23	0.21
	0.006	0.16	0.25	0.35	0.24
	0.010	0.19	0.21	0.22	0.20
Flax+Bamboo	0.002	0.22	0.24	0.25	0.23
	0.006	0.20	0.24	0.25	0.24
	0.010	0.19	0.24	0.26	0.21
Cotton+Sea Cell	0.002	0.19	0.21	0.23	0.20
	0.006	0.15	0.18	0.20	0.22
	0.010	0.17	0.21	0.23	0.18
Soy	0.002	0.15	0.19	0.22	0.19
	0.006	0.15	0.20	0.21	0.20
	0.010	0.15	0.21	0.22	0.20

Fig. 206 y, 207 Comparativa de resultados de la experimentación para obtener el coeficiente de fricción dinámica en tres casos diferentes: con hilados de 6 a 10 mm de diámetro. Y variando la velocidad con diferentes fibras. (Svetnickienė, Čiukas, 2009)

Con el impulso inicial

Con la velocidad de 0,15 m/s

Svetnickienė, V., Čiukas, R., & Čiukas, R. (2016). Investigation of friction properties of yarns from natural fibres. *Mechanics*, 75(1), 73-77.

El cálculo de la fricción mecánica puede ser muy útil en el trabajo con tejidos y para casos donde haya variaciones del tipo de fibras utilizadas en un mismo entramado. Se puede determinar también la fricción dinámica entre fibras (fig. 206 y 207).

Las fórmulas Hertzianas definen y/o determinan los esfuerzos producidos entre dos superficies de contacto, esfuerzos elásticos y deformaciones. (www.fim.umich.mx/teach/abedolla) (20170825)

Contacto de una esfera y un plano

La presión de una esfera sobre un plano se puede definir de manera Hertziana como (figura 203) (www.fim.umich.mx/teach/abedolla):

$$\alpha = 1,11 (F_n R / E)^{1/3}$$

La tensión estará de forma cercana al área de contacto entre superficies pero fuera de ella.

El cortante máximo estará en el área de contacto definido como Z_m :

$$\zeta_{\max} = 0,31 P_{\max}$$

$$Z_m = 0,47 \alpha$$

Para conocer el punto de presión máxima del contacto:

Sabiendo que F_n es la carga normal al plano, E el módulo de Young, R el radio de la esfera y $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$.

$$P_{\max} = -0,388 (F_n E^2 / R^2)^{1/3}$$

Contacto entre dos cilindros

El contacto Hertziano se define de la siguiente manera, vinculado al radio (fig. 204 y 205) (www.fim.umich.mx/teach/abedolla):

$$\alpha = 1,52 (F_n R_1 R_2 / E L (R_1 + R_2))^{1/2}$$

Siendo L : Longitud, R_1 y R_2 : los radios de los cilindros, E : El módulo de Young

Para conocer la máxima presión se puede determinar con la siguiente fórmula:

$$P_{\max} = -0,418 ((F_n / L) E (R_1 + R_2 / R_1 + R_2))^{1/2}$$

Área de contacto real

Fig. 203 Curvas de distribución de presión en el contacto elástico
www.fim.umich.mx/teach/abedolla (20170825)

Fig. 204 Curvas de distribución de presión en el contacto elástico
www.fim.umich.mx/teach/abedolla (20170825)

Fig. 205 Representación esquemática de la distribución de presión en y debajo de las áreas de contacto
www.fim.umich.mx/teach/abedolla/notas/capitulo1.pdf (20170825)

*Fig. 208 Wang Wen - Chih, 2014. Magic castle, Taiwan.
Tejido irregular, estable por densidad y por la estabilidad que adquiere el propio tejido
al conformar una geometría de doble curvatura.
www.caveurban.com (20190907)*

La siguiente fórmula define el contacto entre materiales de carácter elástico-plásticos (www.fim.umich.mx/teach/abedolla):

$$\text{Área real} = F_n / P$$

Sin embargo F_n la fuerza normal sobre una superficie

P : la presión del material mas suave

La relación de área de contacto real (fig. 194) aparente es directamente proporcional a la presión aplicada en la superficie dividida por el esfuerzo de cedencia del material mas suave en contacto.

$$A_r / A = P / \sigma$$

La presión de contacto es un valor finito en el caso de un cilindro y un plano Pero en superficies que presentan singularidades (conos) los esfuerzos no se pueden determinar de la misma forma que con el cilindro.

4.6.4. Empalmes o empates de fibras

En las cuerdas el empalme se realiza con la superposición de la nueva fibra que se trenza o torsiona con el final de la fibra anterior para dar continuidad. Se conocen tradicionalmente como empalmes de ojo (fig. 209) o empalmes continuos.

Cuando los empalmes en cuerdas se realizan mediante el complemento de un elemento tejido de unión que vincula el final de la cuerda con la fibra nueva mas larga entonces las mayores tensiones las soportará ese punto. Las fibras que tejen el empalme ceden progresivamente la tensión a la cuerda propiamente dicha (Leech, S Hearle, Overington, Banfield, & others, 1993).

Para entramados con secciones mayores, como las utilizadas en construcción o para cables de bambú el solape entre fibras tiene relevancia por lo que debe tener una longitud considerable. Para los cables de bambú utilizados en china en las estructuras de puentes colgantes, el solape alcanzaba los 30 cm de longitud en las fibras exteriores (Hidalgo, 2003). La cuerda mediante la torsión hacía que el empalme fuera estable por fricción y por superposición de capas cuando entraba en tensión.

Para entramados de gran escala como espacios arquitectónicos (fig. 208) cuando el patrón de entrelazado no es muy denso se puede además reforzar la sujeción de los empalmes con cuerda o alambre.

Fig. 209 Empalme de cuerda
Leech, C., S Hearle, J., Overington, M., Banfield, S., & others. (1993). *Modelling tension and torque properties of fibre ropes and splices*. The Third International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.

Fig. 210 Diagramas de curva de la cuerda, de izquierda a derecha muestran el resultado de curva con cuerdas de dos, tres y cuatro filamentos que conforman la cuerda de 1 m de largo, con lo cual el número de rotación depende del diámetro y la longitud de la cuerda. Bohr, J., & Olsen, K. (2011). *The ancient art of laying rope*. EPL (Europhysics Letters), 93(6), 60004.

4.7. TIPOLOGÍAS DE TEJIDOS PARA USO EN CONSTRUCCIÓN

4.7.1. La cuerda

La estructura de la cuerda se puede definir como un cuerpo longitudinal y cilíndrico compuesto por fibras flexibles. Su sección es mucho menor que su longitud.

Las cuerdas son elementos continuos y se conforman como estructuras helicoidales a lo largo de un eje de la longitud que sea necesaria. Están formadas por un grupo de fibras con la técnica de torsión o la de trenzado que dan extensión por solape a las fibras. Se busca que la estructura helicoidal genere un elemento flexible y resistente a tracción (McKenna, Hearle, & O'Hear, 2004). Las cuerdas se constituyen como una superposición de trenzados o torsionados de los que se puede identificar desde la parte mínima hasta el conjunto. Son dos tipologías o técnicas distintas que definen las cuerdas, independientemente de los materiales empleados (Giner, 1984). La técnica para la constitución de cuerdas con fibras naturales requiere en principio de la preparación de las fibras (según el tipo de fibra que se utilice), luego las fibras se juntan formando hilos, posteriormente se unen varios hilos formando racimos y estos a su vez en conjunto serán los filamentos de cuerda. La unión entre fibras, hilos y filamentos conforman las cuerdas tanto a torsión como en trenzados. Muchas de las cuerdas se construyen con tres grupos de filamentos torsionados. Se realiza un equilibrio en la técnica de construcción de cuerdas girando hacia un lado el hilado y hacia el contrario los filamentos. La técnica de torsión es el giro de las hebras sobre sí mismas y los trenzados son los tejidos de tres o mas hebras que se van superponiendo. La dos técnicas pueden complejizarse multiplicando en número de fibras empleadas (Giner, 1984). Son fibras que trabajan juntas y dispuestas de manera estratégica, que al igual que los entramados planos, forman una disposición artificial de fibras.

Diagramas de curva de la cuerda: número de rotaciones máximas

Descripción de la curva de la cuerda analizado por Bohr & Olsen (2011)(fig. 210): En los gráficos el eje de las abscisas indica la longitud de la cuerda y el eje de las ordenada el número de rotaciones. La curva mostrada es para dos, tres y cuatro filamentos de cuerda empezando de izquierda a derecha, respectivamente. Las cuerdas fueron formadas por filamentos de 1 m de largo y fibras de 5 mm de diámetro. La geometría

Fig. 211 Imágen de la fabricación industrial de cuerdas de fibras
Fronzaglia, B., & Ropes, N. E. (2006, March). *The History of Rope*. In *The Classic Yacht Symposium*. Herrreshof Marine Museum (Vol. 31).

de estas curvas es universal para las cuerdas dando un número de filamentos, en los cuales el número específico de rotaciones depende del diámetro y de la longitud de la cuerda. En el punto de rotación máxima, la cuerda de triple hebra es siempre el 68% de la longitud de los hilos individuales. Para una cuerda de dos y cuatro filamentos los números son 63% y 69%, respectivamente (Bohr & Olsen, 2011).

Las cuerdas en la historia

Las cuerdas son hasta la actualidad elementos de gran importancia relacionadas con el desarrollo tecnológico y la vida diaria.

Giner (1984) describe que desde la antigüedad se utilizaron variedad de fibras vegetales para la conformación de cuerdas. Se pueden identificar en los textos del científico - naturista Plinio¹⁶ el uso de materiales como: el cuero que al secarse se endurece y toma la forma que se busque, el bambú cortado en tiras que permite realizar tejidos de cuerda, los juncos o el esparto que se conseguían con facilidad en zonas costeras, las hojas de palma o la paja en zona mas secas.

Los rastros de cuerda mas antiguos encontrados datan de los años 6000 a.C., pero sin necesidad de obtener muestras concretas se sabe que la utilización de las cuerdas está presente en las diferentes culturas muchos años antes y podría coincidir con la creación de las primeras herramientas hechas de piedra. Las cuerdas fueron utilizadas para uso cotidiano desde el principio de los tiempos. Para trepar, moverse entre montañas y alcanzar alimentos. Debían a su vez soportar el peso de lo que se trasladaba, de las personas que soportaba o de la tracción a la que eran sometidas. El cuero permitió mejorar la resistencia de las cuerdas al igual que el trenzado de las fibras que aumentaba el grosor de los cables. Los Egipcios muestran en sus dibujos la producción de sus cuerdas de cáñamo y de manila (Evans & Ridge, 2005). Con las cadenas productivas de trabajo que muestran en sus dibujos (fig. 213 y 214) lograban conseguir cuerdas de mayor longitud y que resistían cargas como el coloso. Evans & Ridge (2005) citan a Ridge (1992) quien fue capaz de estimar que se necesitaba una resistencia a tracción de 12,5 toneladas para mover esta figura (Evans & Ridge, 2005).

16 Gayo Plinio Segundo (23 - 79) fue un escritor, científico, naturista y militar latino. Realizó estudios e investigaciones en fenómenos naturales, etnográficos y geográficos, recopilados en su obra *Naturalis historia*, siendo un modelo enciclopédico de muchos conocimientos hasta mediados del S. XVII. (https://es.wikipedia.org/wiki/Plinio_el_Viejo (20190907))

Fig. 212 Partes de la cuerda
Charlton, W. H. (1996). *Rope and the art of knot-tying in the seafaring of the ancient eastern mediterranean* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).

Fig. 213 Dibujo Egipcio que describen la manufactura de cuerdas de fibra de palma, 2000 - 1800 a. C.

Fig. 214 Dibujo Egipcio que muestra el transporte de un Coloso utilizando cuerdas de fibras, 2000 - 1800 a.C.

Evans, J., & Ridge, I. (2005). Rope and rope-like structures. WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, 20.

Las pinturas y tallas egipcias (5000 años atrás) describen también la presencia de cuerdas para trabajos en obras de ingeniería, construcción y navegación (figuras 211 y 212) (Evans & Ridge, 2005).

Se realizó un inventario sobre el uso de las cuerdas y los tipos en Atenas, que eran parte del equipamiento necesario para los barcos de navegación del 330 a. C.. Un inventario que se encontró describe las tipologías de cuerda con diámetros de 4 a 6 pulgadas, sin detallar los materiales naturales con las que estaban hechas, aunque se estima que fueran de cáñamo. (Company Upson Walton, 1902).

“Es entre el S. I y I y medio donde las cuerdas reciben más atención para las invenciones mecánicas. La primitiva rueda, el trabajador, con el cáñamo encordado alrededor de su cintura, y la lenta y laboriosa e imperfecta operación de colocación y trenzado de fibras de labor manual, fueron vistas en Cleveland por los escritores y aún se encuentran en notas en diversas zonas. Los hilos soportados en intervalos se estiraban todo el largo de la cuerda, luego se dividían en un número requerido, posteriormente se trenzaba lentamente juntos en filamentos y estos en cuerdas. Cuando se requerían cables, nuestros padres de antes, torsionaban cuerdas juntas hasta que alcanzaban el tamaño que buscaban. Por supuesto el resultado era una cuerda de fibras desigual y con diferentes resistencias”(Giner, 1984).

Pocos datos hay sobre el uso concreto de las cuerdas en la época medieval, se sabe que con el auge del comercio en Europa con el uso de los buques se intensificó el uso de las cuerdas de uso marítimo. Joseph Huddart realizó en 1780 la mayor innovación en maquinaria de hilado de fibras, lo que permitió aumentar la longitud del hilado de las hebras. Esto causó un cambio considerable en la longitud posible de cuerdas en relación a la cantidad de hebras utilizadas (Fronzaglia & Ropes, 2006).

Con la aparición del Nylon que revolucionó la industria de la cordelería, al igual que el polyester en 1940 y el polipropileno en 1950, la fabricación de cuerdas con fibras naturales (fig. 215) perdió protagonismo desplazada por los nuevos materiales sintéticos (Fronzaglia & Ropes, 2006).

En 1957 se publicó el libro “The technology of cordage fibers and ropes” por David Himmelfarb, donde se describían los novedosos procesos industrializados (fig. 204) (Fronzaglia & Ropes, 2006).

Fig. 215 Proceso para la formación de una cuerda de bambú torsionada con 3 fibras Hidalgo O.L (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-López.

Fig. 216 Puente Quan Xian construido con cables de bambú *Sinocalamus affinis*(construcción: 300 a.C.)
www.reportajes-jmserrano.com/china.htm (20190907)

4.7.2. Cables de bambú

La presencia histórica de las cuerdas / cables (fig. 216, 217 y 218) de bambú en ingeniería.

China tiene una histórica tradición de construcción ligada al bambú como material fundamental. Esto permitió el desarrollo de diferentes elementos como fueron los cables de arrastre hasta construcciones de gran escala de ingeniería por las prestaciones a tracción que ofrece este material (fig. 218 y 219)(Needham, Wang, & Lu, 1971).

Estudios sobre la resistencia de las cuerdas de bambú

Es importante saber que al ser un material natural sus condiciones físicas y anatómicas varían según las especies. Además se sabe que en una misma caña de bambú hay variaciones en su anatomía en respuesta a lo que la planta requiere. La zona y el entorno donde se encuentre el bambú también marcará una respuesta física concreta de adaptación (Hidalgo, 2003)

Actualmente el interés y la posibilidad de evaluar mecánicamente la resistencia de los materiales permiten probar y certificar los esfuerzos máximos a los que pueden ser sometidas, en este caso por ejemplo, las cuerdas de bambú.

*Estudio realizado a las cuerdas con cortes de *Guadua angustifolia* Kunth*

Esta especie es de gran importancia y presencia en América del Sur. Su uso y sus estudios de laboratorio permiten conocer mejor las características propias de este bambú con lo cual existen actualmente muchos elementos constructivos a partir de sus cortes y sus fibras.

Hidalgo (2003) realizó un estudio detallado de las partes de la caña y su uso en construcción, realizó un estudio experimental utilizando esta especie de bambú con la metodología de trabajo con la que realizaban los cables para los puentes suspendidos en China. Se describen los resultados del estudio con *Guadua angustifolia* Kunth que se detallan en su experimentación a continuación:

A) La parte interior, tierna, que es el 70% de la caña. Esta parte absorbe el agua del cemento cuando se usa para reforzar. El estudio analítico de este corte dio como resultado la tensión máxima que alcanzó fue 706 kg/cm².

B) La parte exterior, 30% de la caña, es la parte densa. Absorbe sólo lo

Fig. 217 Imagen de la fabricación industrial de cuerdas de fibras

Fronzaglia, B., & Ropes, N. E. (2006, March). The History of Rope. In The Classic Yacht Symposium. Herrreshof Marine Museum (Vol. 31).

Fig. 218 Cables compuestos por 3 tiras de bambú trenzado

Fig. 219 Cables compuestos por 3 tiras de bambú torsionado

Sastry, C. B., Ramanuja Rao, I. V., Ganapathy, P. M., & Janssen, J. A. (1996). Bamboo, people and the environment: proceedings of the Vth International Bamboo Workshop and the IV International Bamboo Congress, Ubud, Bali, Indonesia, 19-22 June 1995; volume 3, engineering and utilization.

Fig. 220 Imágen de la utilización de cuerdas de bambú para trabajos en el río Amarillo en China. (Foto Todd, 1935)

Needham, J. (1971). Science and Civilisation in China, vol. IV. Physics and Physical Technology, Cambridge University Press.

mínimo. La máxima tensión admisible= 2.052 kg/cm².

La parte exterior por lo tanto es más fuerte que la interior. Los cortes que tienen las dos zonas alcanzan una tensión admisible de 1.175 kg/cm². También se evaluaron las cuerdas hechas de bambú trenzado (fig. 218): con 163 tiras de bambú de 500 mm de largo, 3 mm de grosor de diferentes bambúes y edades. La tensión máxima admisible = 3000 / 3213 kg/cm². (206 fueron obtenidos de bambúes de 1 año y de 1,5 años de edad) (Hidalgo, 2003).

Bárbaro G. (2007) explica que: “la resistencia a tracción de un cable de bambú es de aproximadamente 720 kg/cm². Por lo tanto, una cuerda del diámetro de un brazo de hombre puede resistir hasta 14 toneladas. Los resistentes cables se componen de 3 o más cuerdas, de aproximadamente 5 cm de diámetro, trenzadas. Las internas están hechas con fibras más tiernas procedentes del interior de la caña, mientras que las exteriores están hechas con fibras más resistentes de la corteza, en medida no inferior al 50% de la sección total del cable. Cuando éste se tensa, el trenzado externo aprieta el núcleo más blando. Para dar una idea, un cable de 5 cm de diámetro puede resistir alrededor de 4 toneladas de carga permanente. En China occidental ya en el siglo III d. C. se realizaban tenso-estructuras sin una sola pieza de metal.” (figuras 216 y 221)

Como conclusión Hidalgo (2003) obtiene la certeza de que las cañas utilizadas en China para el trabajo con latillas (tiras o fibras) eran de bambú joven ya que se requería obtener flexibilidad para el trenzado. También realizó pruebas a las cuerdas utilizadas antiguamente en el río Yangtse, sometidas a esfuerzos de tracción continuos (figura 220), donde las latillas exteriores se mantuvieron estables y las interiores compuestas con fibras de bambú más tiernas se rompieron antes. Los resultados obtenidos mostraban que las cuerdas alcanzaron los 1800 kg/cm² de resistencia a tracción (como referencia comparativa: la tensión de rotura del acero es 3900 kg/cm²) (Hidalgo, 2003).

4.7.3. Los tejidos de gaviones

El tejido para conformar los gaviones es probable que sea una de las técnicas más antiguas utilizada en Asia en ingeniería hidráulica (fig. 222, 223, 224). Requieren resistencia y flexibilidad y los cortes realizados

Fig. 221 Imágen del amarre de los cables del puente Quan Xian en China, donde se puede comparar el tamaño de las cuerdas con una peroana
Needham, J. (1971). *Science and Civilisation in China*, vol. IV. *Physics and Physical Technology*, Cambridge University Press.

Fig. 222 Gaviones utilizados en Szechuan (foto 1943)

Fig.223 Pintura China que muestra el trabajo de la gente colocando los gaviones (1417)
Needham Joseph, (1971). *The Shorter Science and Civilisation in China. Civil engineering and nautics. Vol4:3.* England: Cambridge University Press.

Fig. 224 Puente peatonal soportado gaviones de bambú

Hidalgo O.L. (2003). *Bamboo: The gift of the gods.* O. Hidalgo-López.

para la el tejido de estos entramados utilizan la cara externa de la caña, resistente al rozamiento por su alto contenido en sílice.

Son tejidos ligeros que se adaptaban a los diferentes suelos donde debían ser colocados, mayormente aluviales por la presencia de aguas. La apertura del entrelazado dejaba correr el agua y las tensiones que generaban los movimientos sin afectar la estructura propia de los gaviones (fig. 225) (Needham, 1971).

“Los gaviones alargados o en forma de cajón relleno de piedras fueron desarrollados, en el tiempo de Yang Yen y Wang Yen-Shih (-28)” (Needham, 1971).

Según Hidalgo (2003) en la época de Wang Yen-Shih se realizaban gaviones de unos 12 metros de largo y 5 metros de ancho. Actualmente se realizan mas gaviones de 18 metros de longitud. (Hidalgo, 2003)

El sistema hidráulico sao de bambú en China se realizaba tradicionalmente para retener agua de los ríos mediante elementos naturales (figura 198). Se colocaban fajinas (grupos de tallos atados) de caña de sorgo que es una gramínea originaria de India y centro de África, que se unían con cuerdas de bambú. Needham (1971) indica que los diques alcanzaban entre 3 y 9 metros de ancho y con alturas de 10 metros. 20.000 hombres trabajaron en la colocación de los gaviones y fajinas que debían arrastrarse mediante cables de bambú de 30 metros de largo (Needham, 1971).

Se pueden identificar dos metodologías, las mas destacadas por su uso habitual, para la realización de gaviones de bambú:

Por un lado la conformación a partir de tiras o fibras de bambú, manteniendo sólo la cara externa y realizando con ellas un tejido hexagonal de abertura media dependiendo del tamaño de la piedra que se coloque en el interior. La forma obtenida es la de un cilindro u óvalo enteramente cerrado. El solape de las tiras suele alcanzar los 30 cm de su longitud y en muchas ocasiones estos nudos se refuerzan con atado de fibra natural o alambre.

Otro método para la conformación de gaviones es el realizado en zonas cercanas a Indonesia (fig. 226), como Timor Oriental (Timor Leste), a partir de una caña de bambú (*Gigantochloa atter* y *Dendrocalamus asper*) de 1,8 m de largo a la cual se le realizan cortes a lo largo y luego se ejerce una compresión desde los extremos, esta se “abombará”, se obtiene la base para la construcción de un gavión. Luego se realiza el tejido incorporando tiras de bambú cruzadas (tejido hexagonal) y

Fig. 225 Gavión gigante de bambú para uso en ingeniería civil (foto 1958) Needham (1971) Hidalgo O.L (2003). *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-López.

Fig. 226 Gaviones realizados por Ingemar Sävfors y su equipo.
[www.saevfors.se/Erosion/Construction of bamboo](http://www.saevfors.se/Erosion/Construction%20of%20bamboo%20gabions) Construction of bamboo gabions,PDF. 2011 (20170312)

reforzando los nudos de entrelazado con alambre o cuerda (Ingemar Sävfors).

Trabajo experimental (imágenes a la izquierda) de Ingemar Sävfors¹⁷:

“Estos gaviones se hicieron de especies locales en Timor Leste. Este método podría funcionar con prácticamente cualquier bambú. Los bambúes de 5-7 cm de diámetro que son generalmente más baratos y se parten muy bien para la fabricación de estas láminas finas. Los cables de acero que utilizamos fueron 1-2 mm de espesor y el trenzado alrededor de los nudos con una herramienta de alicate el resultado fue una estructura arriostrada transversal muy fuerte” (Ingemar Sävfors)

4.7.4. Los tejidos planos para utilizados en cerramientos

La técnica constructiva que utiliza paneles tejidos planos es conocida con diferentes nombres dependiendo del país o de la zona donde se realiza: en Francia como torchis pan de bois, en Alemania, Holanda y países nórdicos se lo conoce como fachwerk, en Latinoamérica se lo llama bahareque (figuras 227, 228 y 229) o quinchá teniendo una tradición de uso de más de 200 años (Zea, Hebert, López Muñoz, 2014). También se lo puede encontrar en la historia de la construcción de Asia.

Consiste en un entramado ortogonal que generalmente requiere un marco que puede ser de madera. El entramado conforma un paramento, a modo de soporte, que puede estar recubierto de barro formando un muro, o puede usarse de cerramiento directamente.

El marco estructural se realiza tanto en madera como con cañas de bambú. Las urdimbres se colocan a una distancia de 30 a 40 cm entre ellas. Para el entramado con bambú, se utilizan cortes de media caña o de $\frac{1}{4}$ de caña habitualmente, estas variaciones tienen que ver con la especie de bambú que se utilice la cual tendrá un diámetro particular. Otra posibilidad es que el cerramiento tejido se realice con esterillas de bambú: mediante una caña de bambú abierta obteniendo una superficie plana.

Para la realización del tejido de bambú, si se cubre luego con un

Fig. 227 Bahareque hecho con tiras de bambú
www.yr-architecture.com/building-low-cost-sustainable-bamboo-houses/ (20190907)

¹⁷ Arquitecto urbanista Sueco focalizado en la innovación de métodos constructivos adaptados y originarios de cada región, vinculados a la cultural local y sus condiciones.

Fig. 228 Bahareque construido manualmente con tiras de bambú. La disposición de las caras del bambú en el tejido indican que será cubierto con un revestimiento ya que se dispone la cara interior hacia afuera para obtener mayor agarre de la mezcla.
www.yr-architecture.com/building-low-cost-sustainable-bamboo-houses/ (20190907)

Fig. 229 Bahareque construido manualmente con tiras de bambú. La disposición de las caras del bambú en el tejido indican que será cubierto con un revestimiento ya que se dispone la cara interior hacia afuera para obtener mayor agarre de la mezcla.
www.yr-architecture.com/building-low-cost-sustainable-bamboo-houses/ (20190907)

enfoscado, se tiene en cuenta que la cara de mayor absorción y rugosidad de la caña que es la cara interior deberá colocarse hacia afuera del tejido, tanto al interior como al exterior del panel, ya que esto aumentará la adherencia del barro, la tierra y la paja o revestimiento final.

La unión entre la estructura y el entrelazado se puede hacer mediante clavos, atados de alambre o cuerdas de fibras naturales.

En España se pueden encontrar construcciones vernáculas con técnicas similares realizadas con caña brava (*Arundo donax*) y otras fibras como esparto, paja, junco, etc. Lucas Bo (2015) describe la arquitectura popular vernácula del Delta del Ebro las cuales utilizaban entramados planos de cañas para realizar los cerramientos de las paredes. El *Arundo donax* se unía a una serie de cañas dispuestas en vertical, mas gruesas, entre los pilares de madera y se ataban con cordel de esparto entre ellas y a la estructura de madera de eucaliptus o de olivo.

En latinoamérica la quinchá es una práctica constructiva muy común y arraigada que se realiza con carrizo, con caña brava o con bambú (fig. 230). Las dos primeras se utilizan sin extraer la cara externa, sin pelar, con espesores de hasta 1/2 - 3/4. Si se realizan con bambú se cortan en tiras longitudinales. Se realizan trenzados con las cañas para rellenar los paneles de madera que forman la estructura (Salas Serrano, 1992).

Actualmente se pueden encontrar sistemas prefabricados de quinchá o bahareque, en Perú por ejemplo, modulados e industrializados. Son sistemas constructivos registrados, versátiles para utilizarse de forma masiva mediante los materiales locales, con una producción mecanizada. Fusionan de este modo un método tradicional que permite el autoconstrucción con materiales conocidos por la población del sitio donde se produce, empleando la tecnología y la rapidez mecánica actual.

En el número 414-415 de Informes de la Construcción (España) de 1991 se puede encontrar uno de los primeros proyectos de construcción sistematizada de madera y bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) que se desarrolla a partir del sistema constructivo bahareque con esterilla de Colombia. Se trata de la propuesta presentada por J. M. Sebá y G. D. Cardona (Colombia) para el IV concurso Iberoamericano de Informes (fig. 231 y 232). Los cortes de bambú que describen para este sistema constructivo son: "Cepa" (10 a 12 cm de diámetro) para entramados y entrepisos, "Sobrebasa" (8 a 10 cm de diámetro), para muros y cerchas, "esterilla" (25 a 35 cm de ancho), para muros y base de pisos. Las piezas

Fig. 230 Sistema de trenzado en rolizo para construir las membranas de Caña. Sistema de cañizo y por último sistema mixto.

Salas Serrano, J. (1992). *Contra el hambre de vivienda: soluciones tecnológicas latinoamericanas*. Escala.

Fig. 233 Clasificación de las superficies espaciales
Schueller, W. (1983). *Horizontal-span building structures*. John Wiley & Sons.

deben tener mas de 3 años de edad y ser inmunizadas previamente.

Además, se enumeran los cortes de madera aserrada que se necesitan. La descripción detalla el proceso constructivo especificando que los muros se construyen a pie de obra utilizando los paneles prefabricados modulados con estructura de madera, bambú, esterillas, malla de gallinero y revoques.

4.8. GEOMETRÍA DEL ELEMENTO

Directrices de la forma

“La geometría en el campo de las estructuras es la determinación exacta de las líneas, superficies y volúmenes que posean propiedades intrínsecas y ventajosas para transmitir las cargas. Sus formas constituyen normas absolutas en el diseño de estructuras”(Heino, 1997).

Heino (1997) establece como origen de la geometría la naturaleza y por ello hace hincapié en el estudio de la geometría (fig. 233) de las estructuras como técnica a partir de la investigación de la naturaleza. En ella se puede observar la adaptación de las formas geométricas como respuesta a las solicitaciones a las que son expuestas.

Líneas de fuerza

Las líneas de fuerza representan gráficamente las fuerzas internas que actúan a lo largo de un cuerpo. Se muestra con ellas las máximas fuerzas internas y sus direcciones.

“Las formas geométricas básicas se comportan frente a fuerzas exteriores de una manera específica para ellas. Esto quiere decir que cada forma básica posee un mecanismo de resistencia típico. Sin embargo, dentro de esta especificidad, son posibles diferentes sistemas estructurales” (Heino, 1997).

Los cables o cuerdas suspendidos, por ejemplo, adquieren la forma del diagrama de fuerzas, al no poder dar respuesta a las fuerzas aplicadas por su escasa sección frente a su longitud. Se visualiza de este modo la relación entre la geometría y la respuesta mecánica que se observa en el diagrama de fuerzas (Heino, 1997).

Fig.231 Planos de quincha prefabricada

Díaz G. A. (1991). Sistema constructivo “Quincha prefabricada”. Informes de la Construcción. CSIC (43). 414 -415. pag. 25 -33.

Fig. 232 Planos de quincha prefabricada

Carazas, Rivero, 2003. Guía de la construcción parasísmica

Fig. 234

Fig. 236

Fig. 235

Fig. 237

Fig. 234 y 235 Weaving pavilion (2009)
www.davidgarciastudio.blogspot.com.es (20190907)

Fig. 236 Gaviones realizados por Ingmar Sävfors
[www.savfors.se/Erosion/Construction of bamboo gabions,PDF](http://www.savfors.se/Erosion/Construction%20of%20bamboo%20gabions.PDF). 2011 (20170312)

Fig. 237 Swirl (2004) cestería realizada por Ueno Masao
www.sites.google.com/site/bamboouenomasao/ (20200106)

4.8.1. La escala

A partir de la observación de la naturaleza que realizó Galileo Galilei (“Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo”, 1632) fue donde se estableció la relación entre peso y sección, comenzó el desarrollo de la teoría de la escala. Galileo unió la observación, la física y la teoría matemática (Mas - Guindal, 2011).

Las observaciones de Galileo acercaron el estudio relacional entre la geometría o forma buscada y el material, entre el volumen y el área, que admite una resistencia determinada, relacionando la tensión y la densidad o peso específico del material. Al cambiar la escala de trabajo se cambia también su diseño estructural.

“La escala cualifica y cuantifica el problema estructural, ya que, al aumentar el tamaño, la sección resistente aumenta el área (cuadrado de la dimensión) mientras al aumentar el tamaño aumenta el volumen (peso propio) y este aumenta con el cubo de la dimensión lineal, es decir la resistencia aumenta de forma cuadrática a la sección, mientras que el volumen aumenta de forma cúbica”(Mas - Guindal, 2011).

En la construcción de geometrías mediante entramados de bambú, en referencia al factor de la escala, existen varios aspectos a tener en cuenta como son las dimensiones del material con el que se trabaja, el momento de inercia de la sección y la superficie geométrica tejida. Conociendo las generatrices y las líneas de fuerza de la superficie geométrica se puede establecer una relación con los nudos del entramado buscando el equilibrio estructural.

La escala de trabajo con fibras de bambú

El paso desde un tejido de una cesta a un tejido que conforma un espacio arquitectónico (fig. 237 y 234), que por lo tanto se puede recorrer, implica un cambio de escala del conjunto y de las dimensiones del entramado y del corte. Este cambio no puede realizarse linealmente, ya que la resistencia del material, la estabilidad por fricción del entramado y la propia geometría modifican sus parámetros variando su resistencia global (Naboni & Breseghello, 2015). Es por ello que con la selección de las especies de bambú y el corte en fibras de la caña de bambú se realiza el cambio de escala para conformar superficies

Fig. 238

Fig. 238. Tabla que representa en cm y cm2 la relación entre la altura de la pieza / arquitectura estudiada y la sección del corte en fibras. Los datos se obtuvieron de la tabla de la fig. XXX
Elaboración propia

geométricas mediante diferentes tejidos.

Las cañas de bambú admiten diferentes dimensiones de cortes en fibras. Dentro de las posibilidades que delimitan los cortes en fibras de la caña se determinan tanto la sección que se busca obtener como la selección en referencia al comportamiento mecánico que se requiere. La representación gráfica de la figura 238 muestra tres tipologías de corte muy diferentes: desde 1/2 caña de bambú, 1/4 de caña de bambú hasta el corte en fibra de 1/120 de caña de bambú y la selección de la cara externa. La escala del corte, como si de un elemento constructivo se tratara, define una sección de trabajo, una geometría en sí misma, una flexibilidad, unas condiciones mecánicas y una escala de trabajo global.

A modo de análisis de escala vinculando el volumen de un conjunto tejido y el tamaño de la fibra utilizada se realizó un acercamiento al estudio de tres ejemplos construidos.

1. Arquitectura: Weaving pavilion (2009): Pabellón realizado con tejido hexagonal Geometría toroide. Fig. 234 y 235
2. Elemento constructivo: Gaviones: Tipología realizada en Timor Leaste, método experimental realizado por Ingemar Sävfors. Fig. 236
3. Cestería: Swirl (2004) realizada por Ueno Masao. Geometría toroide con tejido de fibras. Fig. 237

se compararon los siguientes datos:

caso de estudio	mediadas m (LxLxH)	volúmen m3	bambu utilizado	diaméto de la caña
1. Weaving pavilion	8x8x5	320	Phyllostachys edulis (Moso)	9 cm
2. Gavión	1,8x0,7x0,7 (Sävfors)	0,882	Dendrocalamus asper	se trabaja con 5-7 cm
3. Swirl	0,62x0,62x0,18	0,0691	Phyllostachys bambusoides (madake)	hasta 15 cm (Liese y Grosser, 1971)

Fig. 239
Elaboración propia

En base a los datos volcados en la tabla (fig 239) se pudo observar que existe un salto en el área del corte entre las fibras para realizar cestería y los cortes en fibras para realizar un elemento constructivo.

Relación entre magnitudes:

Fig. 242

Fig. 243

Fig. 242 y Fig. 243. Representan la relación entre magnitudes de la tabla fig. 227
Elaboración propia

caso de estudio	tipología de corte	ancho de fibra	espesor de fibra	área del corte (ancho por espesor) m2
1. Weaving pavilion	1/2	0,045 m	0,01 m	0,00045
2. Gavión	1/40	0,0175 m	0,02 m	0,00035
3. Swirl	1/128 ? Cara externa	0,003 m	0,002 m	0,000006

Fig. 240

Elaboración propia

Para poder relacionar proporciones se realizó la tabla de magnitudes (fig. 241) indicando el número de veces que aumenta de un caso a otro el corte en fibras, la altura de la pieza o arquitectura analizada y el volumen de la pieza o arquitectura analizada. Se le dio la magnitud 1 al corte en fibras, la altura del elemento construido y el volumen a la pieza de cestería y a partir de ese valor se obtuvieron las magnitudes proporcionales del gavión y de la arquitectura analizados, basadas en los datos de la tabla previa 240.

Caso de estudio	sección	corte en fibras	altura	volumen
1	1/2	65	25	32000
2	1/40	20	4	10
3	1/128	1	1	1

Fig. 241

Elaboración propia

En los diagramas (fig. 242 y fig. 243) se relacionan las magnitudes vinculando el corte en fibras con la altura y el corte en fibras con el volumen. Se observa que no hay linealidad en la relación de magnitudes al realizarse cambios de escala ya que para aumentar la altura o el volumen de la construcción se necesita una mayor sección. La curvatura que se obtiene del análisis de magnitudes es exponencial.

4.8.2. Las geometrías y los entramados

“Las formas de las estructuras en arquitectura son formas constructivas técnicas que derivan de la función de las estructuras de redirigir las solicitaciones externas mediante diferentes estados de equilibrio” (Heinrich, 2000).

Los siguientes análisis gráficos tienen como objetivo establecer

CUBO

Poliedro regular

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

Malla de nudos

Ángulos de flexión en caras

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Cambios de geometría

Ángulos de flexión en caras

Fig. 244
Dibujos originales de Tarnai (2006) indicados . Re dibujados de los originales.
Elaboración propia

conexiones entre las geometrías y los entrelazados, analizando las características necesarias para su constitución como entramados de superficies.

Descripción de los casos estudiados:

Se desarrollaron los análisis sobre las geometrías :

1. cubo (poliedro regular) (fig. 244)

Superficie de simple curvatura , superficie desarrollable:

1. cilindro (fig. 245)

2. cono (fig. 246)

Superficie de doble curvatura , no desarrollables:

1. hiperbolide (anticlástica) (fig. 247)

2. paraboloides hiperbólico (anticlástica) (fig. 248)

3. esfera (sinclástica) (fig. 249)

Análisis

El estudio sistemático de dichas geometrías analizadas gráficamente se realizó con el objetivo de vincular las superficies espaciales con los patrones geométricos de los entramados ortogonales y hexagonales.

Se hace una referencia a los tejidos ortogonales y hexagonales y la posibilidad de conformar la superficie estudiada. En algunos de los casos las curvaturas y/o los puntos singulares exigen cambios en el patrón geométrico de entrelazado para realizarse sin deformarlo.

Observaciones

Se puede observar en el análisis que en casos estudiados como la esfera, el cono, el cilindro, o el paraboloides no necesitan que las fibras se curven formando un ángulo agudo para los tejidos ortogonales, aunque sí se buscará cierta flexibilidad en la fibra que admita la curvatura que la superficie requiere.

Para los tejidos hexagonales se describen las superficies que presentan singularidades, como el cono, con lo cual el patrón de entrelazado deberá dar respuesta a ello.

CILINDRO

Simple curvatura
Desarrollable
 $K=0$

GENERATRICES

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

Malla de nudos

Las fibras deben tener flexibilidad para curvarse formando la superficie.

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Malla de nudos

Fig. 245
Fig. 246
Elaboración propia

CONO

Simple curvatura
Desarrollable
 $K=0$

GENERATRICES

Superficie de revolución

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

Malla de nudos

Ángulos de flexión en caras

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Malla de nudos

Singularidad

Singularidad: cambio del patrón geométrico para resolver el ángulo convexo con un pentágono

Posibles polos del tejido

Redibujado (Petit, 1979)

HIPERBOLOIDE

Doble curvatura
Sinclástica
 $K > 0$

GENERATRICES
Superficie de revolución

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

Malla de nudos

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Malla de nudos

Fig. 247
Elaboración propia

PARABOLOIDE

Doble curvatura
Sinclástica
 $K > 0$

GENERATRICES

Superficie de traslación
Se deben rigidizar los bordes porque reciben empujes de los arcos.

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Malla de nudos

PARABOLIDE HIPERBÓLICO

Doble curvatura
Anticlástica
 $K < 0$

Malla de líneas de fuerza
Catenarias a Tracción
Arcos a Compresión

Mallas de líneas generatrices

Superficie de traslación

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Malla de nudos

Fig.248
Elaboración propia

ESFERA

Doble curvatura
Sinclástica
 $K > 0$

GENERATRICES

Superficie de revolución

Superficie de revolución

Fig. 249.
Elaboración propia

TEJIDOS

ENTRAMADOS ORTOGONALES

Malla de nudos

ENTRAMADOS HEXAGONALES

Malla de nudos

Media esfera
hexágonos + 6 pentágonos

Esfera
hexágonos + 12 pentágonos

Posibles polos del tejido

Redibujado (Petit, 1979)

Fig. 251 Clasificación de las superficies según curvatura de Gauss

Stephan, S., Sánchez-Alvarez, J., & Knebel, K. (2004). Reticulated structures on free-form surfaces. *Stahlbau*, 73(8), 562–572.

4.8.3. La geometría helicoidal

En la formación de cuerdas

Según indican Evans & Ridge (2005) las cuerdas se definen por hélices que se conforman por su radio, R , y por el ángulo α (de la hélice) (fig. 250). La geometría define la propia cuerda, con la curvatura K y la propia torsión que son ambas constantes. La resistencia necesaria en las geometrías helicoidales como las cuerdas es la axial, dependerá de su sección y del área en la que se distribuye.

“La resistencia a flexión de una sección transversal de una forma está dada por el segundo momento del área, que para la sección circular sólida con radio r en su línea central es: $I_c = (\pi r^4) / 4$ ” (Evans & Ridge, 2005).

Fig. 250 Geometría helicoidal
Evans, J. J., & Ridge, I. M. L. (2005). *Rope and rope-like structures*. WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, 20.

4.9. LAS PROPIEDADES DE LAS SUPERFICIES

Según Euclides una superficie es: “Aquello que sólo tiene longitud y anchura” (Euclides, los elementos, libro 1, definición 5º).

Para la geometría y la matemática: La superficie es una extensión en la que solo se consideran dos dimensiones (bidimensional) y está formada por un conjunto de puntos pertenecientes al espacio euclídeo. Se forma con el desplazamiento de una línea en el espacio, y si este movimiento responde a una ley la superficie se llama geométrica (fig. 251).

Superficies de simple curvatura

Este tipo de superficies como son las bóvedas, fueron empleadas por el hombre en la realización de estructuras desde la antigüedad. Constituidos por arcos dispuestos de forma paralela conforman estructuras que trabajan a compresión simple (Schueller & Heck, 1983).

Esta tipología estructural fue evolucionando a lo largo del tiempo, buscando la racionalización del sistema, mediante los avances relativos a la tecnología y los materiales constructivos. En la construcción mediante tejidos de fibra, las superficies de simple curvatura (fig. 252) (desarrollables) facilitan la materialización ya que la constitución de los entramados no requiere de cambios o deformaciones geométricas.

Las bóvedas cilíndricas se pueden diferenciar entre las que están

Fig. 252 Malla triangular en un medio cilindro, superficie de simple curvatura
Schueller, W. (1983). *Horizontal-span building structures*. John Wiley & Sons.

Fig. 253 Wang Wen-Chih , 2017. Sanctuary.

Detalle de entramado hexagonal en el acceso

www.tfam.museum/Exhibition/Exhibition_page.aspx?dllLang=en-us&id=623 (20190907)

construidas mediante entramados ortogonales y los que utilizan hexágonos (retícula triangular).

Los entramados ortogonales se constituyen por la repetición de fibras que formarán los arcos a modo de generatriz de la superficie, se podrían llamar urdimbres en este caso. Las tramas se tejen en el sentido contrario (directrices) formando una retícula que contiene nudos en los cruces. La colocación de fibras diagonales en el tejido colabora en la rigidización de la superficie construida (fig.253).

Las bóvedas construidas por entramados hexagonales necesitan tres direcciones de fibras para realizar el entramado, ya que con dos direcciones formaría un rombo. Esto permite gran variedad de alternativas de arriostramiento del tejido, manteniendo la presencia de la triangulación que lo hace indeformable. En este tipo de entramados los nudos se multiplican y los esfuerzos se reparten mejor que en los entrelazados ortogonales, suponiendo una optimización desde el punto de vista estructural.

Superficies de doble curvatura (no desarrollables)

Son superficies que al extenderse sobre una superficie plana se deforman.

Superficies no desarrollables que conforman estructuras tradicionales como la cúpula esférica (Schueller & Heck, 1983). Se realizaron diversos análisis sobre las subdivisiones geométricas posibles de la esfera para comprender su generación y su construcción.

Tsuboi & others (1984) distinguieron mediante una clasificación la generación de las subdivisiones geométricas de la superficie de doble curvatura, la cúpula esférica:

- La generación a partir de la rotación alrededor de un eje central de los arcos que forman la superficie de revolución, generando un tejido triangulado (fig. 255).

Lamella o arcos paralelos

Se realiza con tres fibras dispuestas en sucesión de arcos meridianos y arcos concéntricos desde el polo (singularidad) hasta la base. Se obtiene un tejido triangular que tendrá deformaciones en el patrón geométrico que permitirán la generación de la curvatura (fig. 254).

- Proyectando poliedros regulares sobre la esfera (proyección del icosaedro sobre una superficie esférica, desarrollada por B. Fuller)

Fig. 254 *Lamella*
Schueller, W. (1983). *Horizontal-span building structures*.
John Wiley & Sons.

Fig. 255 *Esfera, superficie de doble curvatura*
Schueller, W. (1983). *Horizontal-span building structures*.
John Wiley & Sons.

Fig. 256 Vo Trong Nghia. Restaurante Son La. arquitectos, 2014..
Clasificación tipológica 1: sistema de elementos estructurales (explicación página 264)
www.plataformaarquitectura.com Foto: Hiroyuki Oki (20191123)