

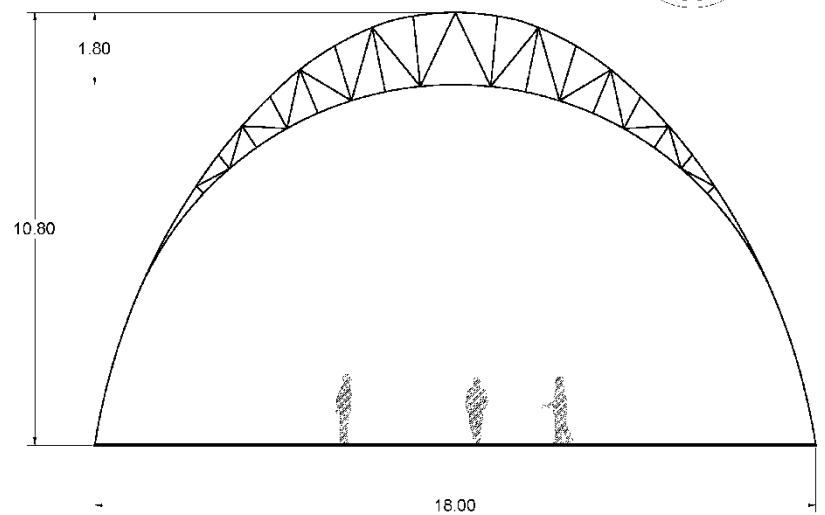
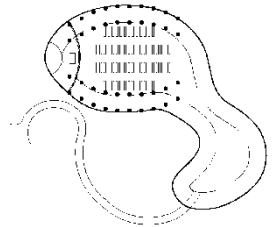


USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE ARQUITECTURA
Escuela de Arquitectura

APLICACIONES DE BAMBÚ PARA GRANDES LUCES, GUATEMALA, GUATEMALA.



Willen Omar Mérida Mijangos



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE ARQUITECTURA

Escuela de Arquitectura

**APLICACIONES DE BAMBÚ
PARA GRANDES LUCES,
GUATEMALA, GUATEMALA**

Proyecto desarrollado por Willen Omar Mérida Mijangos
para optar al título de Arquitecto.

Guatemala, abril 2022

Me reservo los derechos de autor haciéndome responsable de las doctrinas sustentadas adjuntas, en la originalidad y contenido del Tema, en el Análisis y Conclusión final, eximiendo de cualquier responsabilidad a la Facultad de Arquitectura de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

JUNTA DIRECTIVA
Facultad de Arquitectura

MSc. Arq. Edgar Armando López Pazos	Decano
Arq. Sergio Francisco Castillo Bonini	Vocal I
Lcda. Ilma Judith Prado Duque	Vocal II
Arq. Mayra Jeanett Díaz Barillas	Vocal III
Br. Oscar Alejandro La Guardia Arriola	Vocal IV
Br. Laura del Carmen Berganza Pérez	Vocal V
Arq. Marco Antonio de León Vilaseca	Secretario Académico

Tribunal Examinador

MSc. Arq. Edgar Armando López Pazos	Decano
Arq. Marco Antonio de León Vilaseca	Secretario Académico
Arq. Israel López Mota	Asesor
Arq. Alejandro Muñoz Calderón	Asesor
Ing. José Marcos Mejía Son	Asesor

DEDICATORIA

A Dios Padre

Cual brillante estrella Polaris siempre me ha acompañado guiando cada paso, meta, idea o pensamiento marcando así mi norte, ruta y destino sin importar la oscura noche de mi alma su luz nunca ha cesado, descubriendo su omnipotencia al evitar mis caídas, escuchando su voz en el silencio que me alienta y anima a seguir hacia adelante y arriba...

A Dios Hijo (Jesús Nazareno de la Merced de Antigua Guatemala)

Gran parte de la Fe con conocimiento de causa que profeso es gracias al tiempo que he estado en presencia de Él, aún si fuera un pequeño fragmento de Dios quien habita tan bella imagen, para mí es más que suficiente haberlo percibido, y ese encuentro personal ha sido el que ha marcado mis pensamientos y recuerdos habitándolos con su serena mirada...

A Dios Espíritu Santo

Por ser la fuerza interna que guio mi mente y mano para seguir trazando diseños cuando mi alma abatida por el cansancio se quería rendir...

A Virgen María

Dulce Madre tu vista de mí no apartes, y ya que me quieres como una verdadera Madre haz que me bendiga El Padre, El Hijo y El Espíritu Santo.

Amén, amén y amén.

“Gratias Deus per totius adversæ et certamen, maxime per tuo amore ad totius momentum Domine Patri”.

A mis abuelos (Q.E.P.D.)

Los recuerdos de lecciones y consejos que sembraron como semillas, son las raíces que soportan mi vida a través de la cual honro sus vidas.

En sus alas descansa mi esperanza y en mis ojos su recuerdo vive intacto.

A mis padres

Presentes en cada instante de mi existencia a través de recuerdos y la añoranza de verlos un día más, han sido ustedes quienes han hecho de mí la persona que soy, por ello mi vida está orientada a honrar su amor y ejemplo de vida.

“Anne”, el más profundo recuerdo del amor en mi vida...

“Baba”, el más profundo recuerdo de fortaleza en mi vida...

A mis hermanos y hermanas

La historia de mi vida ha sido coloreada por pinceladas de momentos memorables compartidos..., gracias por estar en ella.

A mis sobrinos

Rodrigo mi ancla a un mundo de sonrisas que alegran el alma, gracias por tu sonrisa alegre y sincera.

Leylany mi pasaporte a un cielo iluminado por estrellas que agrandan el alma gracias por tu mirada despierta y vivaz.

A mis amigos

Mishelle, Augusto, Fernando, Rodolfo, Juan, María, Gustavo, entre otros, que siempre han otorgado un significado especial a la palabra “amistad” sabiendo escribir enseñanzas y recuerdos a la historia de vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Carlos de Guatemala y la Facultad de Arquitectura

“*Alma Mater*”, que ha nutrido una meta, preparándome en el campo académico y técnico, sin olvidar el lado social allá a donde vaya “*ite et docete omnes gentes*”.

A todos mis catedráticos

De ellos aprendí lecciones de valor, pero en especial a los catedráticos Saravia, Paniagua, Salazar, Lemus, Mejía, Marroquín, Sandoval, Carrera, cuya determinación por enseñar hicieron de la docencia un propósito de catedra, ayudándome a formar un criterio propio, el cual aplico en mi trabajo.

A mis asesores de tesis

Alejandro Muñoz, Israel López y Marcos Mejía, gracias por su amistad, apoyo y consejos durante la realización de este trabajo, que me permite completar una meta profesional.

Al personal de la biblioteca

Por su disposición para ayudar a todos los estudiantes. Especial agradecimiento a Verónica que siempre hizo accesible el conocimiento y sabiduría de la profesión, iluminando las mentes para encontrar soluciones durante el proceso de formación.

Al Fondo de Cooperación y Desarrollo Internacional de Taiwán (ICDF, por sus siglas en inglés) por medio del Departamento de Cooperación Técnica

Gracias a la Misión Técnica de la República de China (Taiwán), por su valiosa ayuda al permitir las visitas a las instalaciones y poder fotografiar los edificios presentados en el presente trabajo, en especial gracias a la Arq. Ilse Lorena Pivaral por la ayuda e información técnica facilitada.

Arq. Billy R. Jacobs R.

Se dice que un aprendiz de escritor encuentra sus propias palabras en versos de otro escritor, en mi caso fueron líneas, buena parte de mis trazos y criterios de profesión los encontré en sus diseños y ejercicio profesional.

Arq. Alejandro Muñoz Calderón

La arquitectura ha de generar sensaciones en el usuario, lo comprendí en la excelente integración de sus diseños, y se ha convertido en una premisa de mis diseños.

Arq. Erika Wittig de Barrueto

La arquitectura no se limita a materia, muchas veces lo más importante es el factor humano el que marca la diferencia, gracias por su ejemplo vívido.

ÍNDICE

ÍNDICE DE IMÁGENES	XIX
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	XXIII
ÍNDICE DE TABLAS	XXV
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
JUSTIFICACIÓN	3
Características constructivas del bambú	4
Especificación general	4
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS COMPLEMENTARIOS	6
DELIMITACIÓN DEL TEMA.....	7
Temporal	7
Geográfica	7
Demanda por atender.....	7
Teórica.....	7
METODOLOGÍA	7
Referente teórico.....	9
Análisis:	11
Anclaje:.....	11
Aplastamiento:	11
Arco:	11
Arco funicular:.....	11
Armadura:.....	11
Bambú:	11
Caña de bambú:	11
Carga:.....	12
Catenaria:	12

Cercha:	12
Cercha plana:	12
Colapso estructural:	12
Compresión:	13
Concentrada (carga):	13
Cortante:	13
Culmo (Caña de bambú):.....	13
Cúpula geodésica:	13
Descuelgue:	13
Distribuida (carga uniformemente):.....	13
Elemento estructural:	13
Esterilla:	13
Estructura:	14
Estructura de forma activa:	14
Estructura vectorial activa:	14
Estructura superficial activa:	14
Flexión:	14
Fuerza:.....	14
Geometría:.....	14
Geometría euclidiana:.....	14
Inmunizar:.....	15
Latas:	15
Leptomorfo:.....	15
Malla Espacial:.....	15
Módulo:	15
Nudo:	15
Paraboloide:.....	15
Paraboloide hiperbólico:	16
Paquimorfo:	16
Peralte:	16
Pimboo:.....	16
Resistencia:	16
Riostra:	16

Riostrar (Arriostrar):.....	16
Shou sugi ban:.....	16
Taxonomía:.....	16
Tensión:.....	17
Tracción:.....	17
Torción:.....	17
Torción (cargas de):.....	17
Unión:	17
Viga:	17
Viga de alma abierta (“Joist”):.....	17
Yakisugi [焼杉] (comúnmente mal llamado “Shou Sugi Ban”)	17
FUNDAMENTO ESTRUCTURAL.....	19
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTRUCTURAS	21
ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA	21
ESTRUCTURAS DE VECTOR ACTIVO.....	26
Cerchas curvas:	29
Mallas espaciales:.....	30
SISTEMAS ARMADOS	31
Armaduras	32
Marcos espaciales	34
Conexiones	34
Apoyos	35
Domos geodésicos:.....	35
Geometría	36
BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	41
BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	43
Antecedentes del bambú en Guatemala.....	43
¿QUÉ ES EL BAMBÚ?	43
ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN	44
BREVE DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA	46
Rizoma:	46
Culmo	46

Yema	47
Ramas	48
Hoja caulinar	48
Follaje	49
Inflorescencia:.....	49
Floración:.....	49
Fruto:	50
EL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN.....	50
Distribución geográfica y ecología de bambú	51
Geografía	51
ESPECIES DE BAMBÚ PRESENTES EN GUATEMALA, ESTUDIADAS PARA SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN	52
<i>Bambusa arundinacea</i>	52
<i>Bambusa textilis</i>	52
<i>Bambusa tulda</i>	53
<i>Bambusa tuldoides</i>	54
<i>Bambusa vulgaris</i>	54
<i>Bambusa gigantochloa verticillata</i>	55
<i>Bambusa guadua angustifolia</i>	55
<i>Bambusa melocanna baccifera</i>	56
<i>Bambusa phyllostachys bambusoides</i>	56
<i>Bambusa chusquea pittieri</i>	57
<i>Bambusa giganteus apus</i>	57
Características físicas de las especies estudiadas.....	58
Propiedades mecánicas de las especies estudiadas.....	59
Fallas en el bambú por esfuerzos mecánicos.....	62
PREPARACIÓN DE BAMBÚ PARA UTILIZARLO EN CONSTRUCCIÓN	67
TRANSFORMACIONES DEL BAMBÚ EN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN ..	68
SELECCIÓN	73
CORTE	74
CURADO EN LA PLANTACIÓN O BOSQUE	76
PRESERVACIÓN	77
LIMPIEZA	81

BLANQUEAMIENTO	82
SECADO	82
CLASIFICACIÓN	83
ALMACENAMIENTO	84
CONTROL DE CALIDAD.....	85
Casos de estudio internacionales.....	87
Casos de estudio nacionales.....	109
Detalles constructivos	121
Uniones	123
Columnas	126
Vigas, cerchas y pórticos.....	128
Arcos	129
Techos.....	130
Bóvedas.....	130
Cúpulas	131
Paraboloides hiperbólicos.....	132
Uniones amarradas	133
Uniones con pasantes	134
Uniones de encaje.....	135
Empalmes de piezas horizontales	135
Soportes de vigas horizontales.....	136
Reforzamiento de concreto con bambú	137
DETALLES CONSTRUCTIVOS DE PROYECTOS ANALIZADOS EN CASOS DE ESTUDIO	137
Templo luum desarrollado por CO-LAB Design Office	137
Pabellón de deportes de bambú para la Escuela Internacional Panyaden desarrollado por Chiangmai Life Construction.....	139
La Ceiba desarrollado por Lucila Aguilar Arquitectos	141
RECOMENDACIONES PARA USAR EL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES:	144
COSTO DE CONSTRUCCIÓN CON BAMBÚ EN GUATEMALA.....	147
Aplicación teórica	149
Elección del sistema estructural:	153

Criterios de predimensionamiento estructural.....	153
Geometría aplicada	156
Arcos catenarios	156
Relación entre estructuras tensadas y arcos catenarios.....	157
Predimensionamiento estructural	158
Predimensionamiento de Peralte de la cercha	159
Comparativa entre resultados obtenidos	161
Selección de especie de bambú a utilizar.....	161
Selección de la técnica constructiva a utilizar.....	162
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	171
Alternativa para trazo geométrico de arcos	173
CONCLUSIONES.....	175
RECOMENDACIONES	179
REFERENCIAS.....	181

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Metodología de investigación	8
Imagen 2: Partes de caña de bambú	12
Imagen 3: Estructuras de arcos, 1) Arcos lineales, 2) Bóvedas 3) Retículas abovedadas.	22
Imagen 4: Arco funicular.....	23
Imagen 5: Mecanismo de palanca del arco funicular.	23
Imagen 6: Formas que adquiere el arco funicular según el tipo de carga.	24
Imagen 7: Absorción de empujes horizontales en el arco funicular.....	24
Imagen 8: Relación altura del arco funicular vs. reacción horizontal.....	25
Imagen 9: Desplazamiento del arco funicular según los factores externos.....	26
Imagen 10: Cerchas planas 1) de cordón superior, 2) de cordón inferior 3) de dos cordones 4) sobreelevados	27
Imagen 11: Influencia de la altura vs. los esfuerzos en las barras de la cercha plana..	28
Imagen 12: A mayor número de barras se reducen los esfuerzos en el cordón superior.	28
Imagen 13: Mallas típicas para las cúpulas geodésicas.....	29
Imagen 14: Mallas típicas para las cúpulas geodésicas.....	29
Imagen 15: Mallas espaciales 1) sistemas planos, 2) sistemas plegados 3) sistemas curvos 4) sistemas lineales	30
Imagen 16: Aumento de la eficiencia al aumentar la continuidad en los ejes.....	30
Imagen 17: Estabilidad del triángulo como figura articulada.	32
Imagen 18: Elementos de una armadura / joist.....	32
Imagen 19: Tipos de armaduras.....	32
Imagen 20: Juntas de las armaduras.	33
Imagen 21: Comparación entre sistemas estructurales.	34
Imagen 22: Tipos de conexiones.....	35
Imagen 23: Apoyos, para alcanzar la eficiencia económica de debe evaluar el número.	35
Imagen 24: Subdivisión de una forma geométrica a) lado original poliedro platónico, b) dos frecuencias, c) tres frecuencias y d) cuatro frecuencias.	36
Imagen 25: Subdivisión de un lado geodésico triangular.	36
Imagen 26: Distribución de cargas en domos geodésicos: a) esfuerzos de tensión y compresión, b) reacciones de los soportes en un domo hemisférico.	37

Imagen 27: Relación inversamente proporcional entre peralte y frecuencia de la estructura y relación directamente proporcional entre peralte de estructura y resistencia de la estructura.....	37
Imagen 28: Incremento de resistencia de la estructura al agregar una segunda capa..	38
Imagen 29: Detalle del exterior de un panel hexagonal típico de Missouri Botanical Gardens Climatedon.....	38
Imagen 30: Partes del bambú “Rizoma Paquimorfo”	46
Imagen 31: Partes del bambú “Culmo de bambú”	47
Imagen 32: Partes del bambú “Yema de bambú”	47
Imagen 33: Partes del bambú “Ramas de bambú”	48
Imagen 34: Partes del bambú “Ramas de bambú”	48
Imagen 35: Partes del bambú “Follaje de bambú”	49
Imagen 36: Partes del bambú “Fruto de bambú”	50
Imagen 37: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Compresión paralela a la fibra”	60
Imagen 38: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Compresión perpendicular a la fibra”. 60	
Imagen 39: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Cortante por compresión perpendicular a la fibra”	61
Imagen 40: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Aplastamiento por compresión perpendicular a la fibra”	61
Imagen 41: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Tracción paralela a la fibra”	62
Imagen 42: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Flexión perpendicular a la fibra”	62
Imagen 43: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Torción en las fibras”	62
Imagen 44: Fallas en el bambú “Tensión paralela a la fibra”	63
Imagen 45: Fallas en el bambú “Compresión paralela a la fibra”	63
Imagen 46: Fallas en el bambú “Corte paralelo a la fibra”	64
Imagen 47: Fallas en el bambú “Tensión perpendicular a la fibra”	64
Imagen 48: Fallas en el bambú “Clivaje”	65
Imagen 49: Fallas en el bambú “Pandeo local de las fibras”	65
Imagen 50: Partes utilizables del bambú.....	67
Imagen 51: Formas de cortar latas de bambú: 1) Machete, 2) Cortador circular de hierro y 3) Máquina “lateadora”	69
Imagen 52: Remoción de tabiques intermedios de las latas.	69
Imagen 53: Cortes del culmo para hacer esterilla	70
Imagen 54: Abrir el culmo para hacer esterilla.	70
Imagen 55: Despliegue del culmo para hacer esterilla.	71
Imagen 56: Remoción segmento de diafragmas en los nudos del culmo.....	71
Imagen 57: Proceso de secado de la esterilla.	72
Imagen 58 Almacenamiento de la esterilla	72
Imagen 59 Fabricación de pinboo	73
Imagen 60: Selección de culmos en edad de corte.....	74
Imagen 61: Corte correcto de culmos de bambú.....	75
Imagen 62: Curado en la plantación A) Selección, B) Corte, C) Secado en plantación D) Quitar ramas y hojas del culmo de bambú.	76

Imagen 63: Partes a proteger con repelente natural 1) Sección transversal del corte, 2) Las paredes laterales, interiores y visibles del entrenudo, 3) Tabique inmediato.....	77
Imagen 64: Procedimiento curado de culmos por calor.	79
Imagen 65: Perforación de los nudos del culmo.....	80
Imagen 66: Proporción de la solución de pentaborato	81
Imagen 67: Inmersión de culmos en la solución de pentaborato.....	81
Imagen 68: Escurrimiento de culmos	81
Imagen 69: Blanqueamiento de culmos.	82
Imagen 70: Secado tradicional de culmos.....	83
Imagen 71: Almacenamiento de culmos clasificados por calidad.....	84
Imagen 72: Uniones entre culmos de bambú para añadir longitud al elemento.	123
Imagen 73: Tipos de cortes “Boca de pescado” (izquierda), “Pico de flauta” (derecha).	124
Imagen 74: Uniones entre culmos de bambú con alambre galvanizado o con lazo natural y empleo de pasadores de madera dura.	124
Imagen 75: Uniones entre culmos de bambú con alambre galvanizado o con lazo natural.	125
Imagen 76: Uniones articuladas entre culmos de bambú con piezas y pasadores de madera dura.	126
Imagen 77: Uniones articuladas entre culmos de bambú con pernos de acero.	127
Imagen 78: Terminación cónica de culmo de bambú con carilla roscada para anclaje.	128
Imagen 79: Tipos de cerchas en bambú para soportar grandes cargas.	129
Imagen 80: Tipos de paraboloides hiperbólicos generados con líneas rectas (izquierda) y generado con parábolas (derecha).....	132
Imagen 81: Amarre cuadrado y amarre de aspas.	133
Imagen 82: Unión con clavijas, anclaje de madera o anclaje metálico.....	134
Imagen 83: Unión en cruz con pasador, unión lateral con pasador y clavijas y unión de esquina.....	135
Imagen 84: Unión con doble cuña de madera y unión con pasadores y ajustadores del amarre.	135
Imagen 85: Viga de cuatro elementos, doble viga Central, doble viga lateral, vigas dobles laterales.....	136
Imagen 86: Gráfica relación luz (L) y altura (H) en arcos de madera laminada o arcos triangulados en acero.....	154
Imagen 87: Gráfica resultado relación luz- altura de arco en madera	155
Imagen 88: La idea de Hooke sobre la analogía entre arco y cadena (izquierda) y cálculo de un puente empleando un modelo colgante (derecha).	156
Imagen 89: Forma funicular = adaptabilidad del cable bajo la acción de cargas externas.	157
Imagen 90: El descuelgue de un cable suspendido en dos puntos a la misma altura.	157
Imagen 91: Diseño por Catenaria de cable a arco funicular (izquierda) y de Malla en suspensión a estructura reticular cuadrada a compresión (derecha).....	158

Imagen 92: Predimensionamiento de peralte “joist” con bambú.....	159
Imagen 93: Gráfica para el diseño preliminar de armadura horizontal de madera.	160
Imagen 94: Conceptos del arco catenario aplicados al proyecto.	171
Imagen 95: Geometrización de los elementos de la cercha de bambú.	172
Imagen 96: Geometría del huevo - el eje menor es el radio de la parte baja de la parábola, en la intersección a 45 grados del radio del eje menor se obtiene el centro que forma la cumbre de la parábola.	173

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Especies de bambú <i>Bambusa guadua angustifolia</i> .	44
Fotografía 2: Especies de bambú <i>Dendrocalamus asper</i> .	45
Fotografía 3: Especies de bambú <i>Bambusa gigantocloa verticillata</i>	45
Fotografía 4: Partes de bambú “Floración en bambú”.	50
Fotografía 5: Especies de bambú <i>Bambusa arundinacea</i>	52
Fotografía 6: Especies de bambú <i>Bambusa textiles</i> .	53
Fotografía 7: Especies de bambú <i>Bambusa tulda</i> .	53
Fotografía 8: Especies de bambú <i>Bambusa tuldoides</i> .	54
Fotografía 9: Especies de bambú <i>Bambusa vulgaris</i> .	54
Fotografía 10: Especies de bambú <i>Bambusa gigantocloa verticillata</i> .	55
Fotografía 11: Especies de bambú <i>Bambusa guadua angustifolia</i> .	55
Fotografía 12: Especies de bambú <i>Bambusa melocanna baccifera</i> .	56
Fotografía 13: Especies de bambú <i>Bambusa phyllostachys bambusoides</i> .	56
Fotografía 14: Especies de bambú <i>Bambusa chusquea pittieri</i>	57
Fotografía 15: Especies de bambú <i>Bambusa giganteus apus</i> .	57
Fotografía 16: Modificación física del bambú por formaleta “Culmo cuadrado”.	68
Fotografía 17: Detalle hipérbolas tejidas y arcos perimetrales con latas de bambú.	129
Fotografía 18: Detalle techo tejido de cúpula con culmos de bambú.	130
Fotografía 19: Detalle bóvedas tejidas con culmos de bambú.	131
Fotografía 20: Detalle cúpula de bambú.	131
Fotografía 21: Detalle concha formada por hipérbolas con culmos dobles de bambú.	132
Fotografía 22: Detalle estructura portante.	137
Fotografía 23: Detalle anclaje a cimentación.	138
Fotografía 24: Detalle de anclaje a anillo central.	138
Fotografía 25: Vista general del proyecto.	138
Fotografía 26: Izado de marcos estructurales con grúa.	139
Fotografía 27: Vista general de la estructura de cubierta.	139
Fotografía 28: Detalle anclajes y uniones entre culmos.	140
Fotografía 29: Detalle entramado superficie cubierta.	140
Fotografía 30: Trazo de marcos estructurales en bambú.	141
Fotografía 31: Izado de cerchas curvas de bambú.	142
Fotografía 32: Vista interior cerchas curvas en bambú.	142
Fotografía 33: Apoyo central paraboloides hiperbólico.	142
Fotografía 34: Izado paraboloides hiperbólico en bambú.	143
Fotografía 35: Vista interior módulo de duchas.	143

Fotografía 36: Paraboloides con apoyos perimetrales.	143
Fotografía 37: Paquetes de bambú para contrarrestar deformaciones por cargas puntuales.	144
Fotografía 38: Capas de bambú para superficie activa.	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativo entre sistemas estructurales analizados y las ventajas y desventajas en bambú.	39
Tabla 2: Comparativo de ventajas y desventajas del bambú como material de construcción.	51
Tabla 3: Características físicas de 4 especies de bambú, Grupo A	59
Tabla 4: Características físicas de 4 especies de bambú Grupo B	59
Tabla 5: Características físicas de 3 especies de bambú Grupo C.	59
Tabla 6: Propiedades mecánicas de las especies de bambú.	66
Tabla 7: Tabla de clasificación de bambú según la calidad de culmos.	83
Tabla 8: Comparativo de precios de construcción según sistema constructivo.....	147
Tabla 9: Resumen criterios Sistema estructural “arco funicular”.	153
Tabla 10: Resumen criterios sistema estructural “cercha plana”.....	153
Tabla 11: Criterios dimensionamiento de arcos de madera laminada.....	154
Tabla 12: Criterios dimensionamiento de arcos triangulados en acero.....	155
Tabla 13: Criterios dimensionamiento de armadura Warren en acero.	159
Tabla 14: Comparativa de resultados dimensionamiento de peralte armadura.....	161
Tabla 15: Dimensionamiento de peralte de cerchas de bambú.....	171

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se aborda la aplicación de bambú como estructura portante para grandes luces. Como parte del capítulo introductorio se presentan antecedentes, justificación, delimitación y objetivos del trabajo. En el primer capítulo, Referente teórico se enlista la terminología empleada en el desarrollo de la investigación; en el segundo capítulo, Fundamento estructural, se analizan los sistemas estructurales con mayor potencialidad para usar bambú, en el tercer capítulo, Bambú como material de construcción, se estudian las características físicas y mecánicas de las especies de bambú presentes en el país, así como también, los principales procesos de curado, preparación y transformación del bambú para su utilización en la construcción. En el cuarto capítulo, Casos de estudio internacionales, se presentan láminas que resumen proyectos seleccionados, en donde se ha aplicado el bambú para cubrir grandes luces con la finalidad de dar a conocer la potencialidad del bambú. En el quinto capítulo, Casos de estudio nacionales, al igual que en el capítulo anterior, se presentan láminas resumen de proyectos en bambú existente en Guatemala, para dar a conocer las potencialidades del bambú aprovechadas en nuestro país. En el sexto capítulo, Detalles constructivos, se presenta una serie de técnicas, criterios y soluciones para usar el bambú como estructura portante. También se analizan detalles y soluciones de proyectos internacionales estudiados y se presenta un cuadro comparativo de costos de sistemas constructivos de dominio común frente a la construcción con bambú. En el séptimo capítulo, Aplicación teórica, se analiza un proyecto diseñado durante la carrera y se propone una metodología de predimensionamiento para arcos en bambú, aplicando análisis geométrico y se presentan los resultados obtenidos mediante la investigación y metodología empleada.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente trabajo de tesis.

ANTECEDENTES

Debido al desconocimiento de la información técnica disponible y a la falta de difusión de las capacidades del bambú como material de construcción, el empleo de este ha sido escaso, limitando su utilización como estructura principal en casa de interés social en algunos departamentos del país. En algunos casos ha sido usado en parales de formaleta o andamiaje en las obras de construcción ubicadas en la boca costa del país, lo cual denota hasta cierto punto, una desconfianza contradictoria a la resistencia del bambú.

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) y la Comisión Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) en la *Norma de Reducción de Desastres NR-1* describen los siguientes usos del bambú: *“Puede emplearse para fabricar la mayoría de partes de una casa, sin embargo, en muchos de los casos se combina con otros materiales de construcción, tales como: madera, arcilla, cal, cemento, hierro galvanizado y hojas de palma; de acuerdo con su conveniencia relativa, disponibilidad y costo.”* (AGIES, CONRED 2008), con base en lo anterior, se puede establecer un punto de partida para desarrollar o profundizar el estudio del bambú y sus aplicaciones en la construcción para grandes luces.

Aunque existe documentación referente al uso del bambú en la construcción, estos documentos fueron escritos, editados y publicados en otros países, para ello han adaptado el uso del bambú a las condiciones propias de cada país, así como a las solicitudes propias de cada proyecto. A los mismos se tiene acceso en nuestro país y hasta cierto punto, con las distancias pertinentes, se han aplicado y adaptado en nuestro medio, usándolos como referencia en el desarrollo de temas y estudios relacionados a la utilización del bambú en vivienda de interés social.

JUSTIFICACIÓN

Por lo anteriormente expuesto, se determina que el empleo del bambú en las obras de construcción es limitado, debido a la falta de información que analice las condiciones del país para la aplicación tecnificada y segura del mismo, en otro tipo de obra o actividad relacionada con la construcción. La presente investigación aporta otra alternativa para el desarrollo sostenible de infraestructura básica, principalmente, en comunidades pertenecientes a la boca costa guatemalteca debido a la proximidad de las zonas de cultivo y crecimiento del bambú, así como en otras regiones del país, con el fin de maximizar la factibilidad de su uso.

Características constructivas del bambú

“- Por sus extraordinarias características físicas se puede utilizar en todo tipo de elemento estructural, que incluye desde cables para puentes colgantes, pasando por vigas, columnas, hasta estructuras geodésicas y laminadas.

- Su forma circular y su sección por lo general hueca, lo hacen un material liviano, lo cual permite la construcción rápida de estructuras temporales o permanentes.

- En cada uno de los nodos existe un tabique de pared transversal que además de hacerlo más rígido, evita su ruptura al curvarse.

- La superficie natural del bambú es lisa, limpia, de color atractivo y no requiere ser pintada, raspada o pulida.

- Puede emplearse en combinación con todo tipo de materiales de construcción, inclusive con el concreto.

- También puede usarse como reemplazo de las barras longitudinales y estribos en concreto reforzado.

- Sin embargo, en contacto permanente con la humedad del suelo se pudre y es atacado por termitas y otros insectos; por ello, para ser utilizado en la cimentación necesita de tratamiento previo para su preservación.

- Otra desventaja que tiene es que los tallos no tienen un diámetro igual en toda su longitud. Tampoco es constante el grosor de la pared y los entrenudos se van haciendo más largos con la altura.” (AGIES, CONRED 2008)

Especificación general

“- La mejor calidad de bambú se consigue en plantas en estado sazonado, es decir, mayores de 4 años. No puede utilizarse bambú con más del 20% de contenido de humedad ni por debajo del 10%.

- El bambú debe inmunizarse para evitar el ataque de insectos xilófagos.

- No puede exponerse al sol ni al agua en ninguna edificación, pues la acción de los rayos ultravioletas produce resecamiento, fisuración, decoloración y pérdida de brillo, y los cambios de humedad pueden causar pudrición.

Uniones

- *La forma de sujeción más común es el amarre, para lo cual se puede utilizar alambre galvanizado, cuerdas de nylon o cualquier material durable y resistente. Aunque también pueden usarse clavos, pernos o pasadores.*
- *El sistema más recomendable para la colocación de clavos consiste en hacer previamente una perforación con una broca piloto, con diámetro ligeramente menor al del clavo que se va a utilizar, introduciéndolo después con suaves golpes de martillo. Este sistema no provoca fisuras en el bambú seco y la posibilidad es menor en el bambú verde, el cual se seca en la estructura ya montada.*
- *Los agujeros para los pernos o pasadores no deben ser ensanchados por clavado sucesivo o girando un clavo dentro del agujero ya que podría ocasionar alguna fisura.” (AGIES, CONRED 2008)*

De Simón Vélez, arquitecto colombiano con experiencia en la utilización de la especie de bambú guadua en proyectos de diferente índole y características, indica su opinión sobre el bambú de la siguiente manera: “Con la guadua tuve todos los problemas posibles pues al ser hueca, que es su principal virtud, se presentaron las mayores dificultades para resolver las uniones, en especial las que tienen que transmitir esfuerzos de tracción”.

“En principio utilicé la guadua en estructuras que sólo tuvieran cargas a compresión, como es el caso de los arcos, cuya geometría obliga a sus componentes a trabajar de esta manera. Así eran los arcos de ladrillo o piedra de los romanos. Para este caso desarrollé un tipo de unión y de sistema constructivo que, aunque obvio y simple, a nadie se le había ocurrido, Con él pude lograr luces hasta de 20 mts., para cubiertas en mortero de cemento y teja de barro española, bastante pesadas.

Con estructuras en que aparecen grandes voladizos para cubiertas de iguales características, descubrí que para las uniones de los enormes esfuerzos de tracción que se presentaban, había que rellenar los cañutos con cemento, donde sucedían dichas uniones, para que este tomara los esfuerzos de platinas y tornillos, transmitiéndoselos a los tímpanos, que a su vez los pasaban a todas las fibras de la guadua, impidiendo así que esta se rasgara.

Las fibras de la guadua, asombrosamente resistentes a la tracción, son como una especie de acero vegetal. En estas estructuras hay que tener en cuenta la resistencia de los tornillos, no la de la guadua.

Con un sistema de construcción de estructuras de guadua en que están resueltas las uniones para tracción y compresión, se puede entrar a competir en igualdad de condiciones frente a materiales como la madera aserrada, el hierro o el concreto...

Desde la mata viene aligerada, modulada, barnizada. No necesita intermediarios, no tiene desperdicios por aserrío o por cortes.

Es la especie de más rápido crecimiento y la de propiedades estructurales más extraordinarias.

Su relación peso-resistencia solo es comparable con las obtenidas por las aleaciones de metales de la era espacial.

A pesar de que hay que inmunizarla, la guadua es un milagro.” (Villegas 1989)

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un documento de consulta y referencia de fácil comprensión para estudiantes, profesionales y personas relacionadas con la utilización del bambú como material de construcción, que presente una alternativa para el desarrollo de áreas con baja o nula infraestructura de servicios con la aplicación de materiales y técnicas vernáculas tecnificadas que maximicen las propiedades físico-mecánicas del bambú.

OBJETIVOS COMPLEMENTARIOS

- Determinar la posibilidad de uso de bambú en elementos estructurales para grandes luces, por ejemplo, salones comunales y pabellones.
- Establecer la factibilidad técnica de aplicación del bambú en sistemas estructurales de forma activa y de vector activo.
- Analizar la factibilidad económica y técnica del uso de bambú versus acero y concreto.
- Exponer la metodología para uso y aplicación de geometría en el predimensionamiento y diseño de elementos estructurales con bambú.
- Establecer un método de dimensionamiento y modulación estructural para bambú en cerchas de arco.
- Investigar los tipos de anclajes que pueden utilizarse en las uniones de bambú.

DELIMITACIÓN DEL TEMA

Temporal

Para la realización del estudio se consultaron fuentes de información elaboradas en un período de 20 años previos al presente trabajo.

Geográfica

Por la versatilidad de utilización del bambú como material de construcción no se debe limitar su aplicación a una región en específico, por lo que su área de incidencia abarca el territorio nacional.

Demanda por atender

Por tratarse de un estudio de aporte y generación de conocimiento, el segmento de la población al que se dirige se constituye de: estudiantes y profesionales de la Facultad de Arquitectura, así como de población interesada en el tema.

Teórica

El tema de estudio se enfoca en las capacidades estructurales del bambú, especialmente en establecer un módulo de vigas de vector activo tipo joist, para su desarrollo se emplearon materias, tales como: geometría, análisis geométrico estructural, lógica y tipología estructural, en aras de establecer lineamientos para su utilización en proyectos de grandes luces, basándose en información, estudio de casos análogos de proyectos similares.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se empleó el método científico, aplicando además, el método sintético para procesar, seleccionar y aplicar la información a utilizar en el desarrollo de la investigación, usando el razonamiento inductivo aplicado a ejemplos de construcciones de bambú empleados en el país, así como también, las metodologías empleadas en otros países con características similares a Guatemala, se estableció la base para formular recomendaciones para el uso del bambú en grandes luces. (Valdez Cancinos, David. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; ICTA 2013)



Imagen 1: Metodología de investigación
Elaboración propia (2019).

Referente teórico

Análisis:

Distinción y separación de las partes de algo para conocer su composición. (Real Academia Española 2017)

Anclaje:

Acción y efecto de anclar (sujetar al suelo o a otro lugar) (Real Academia Española 2017)

Aplastamiento:

Acción o efecto de aplastar. (Real Academia Española 2017)

Arco:

Estructura curva aplicada para salvar huecos o tramos de obra, y proyectada para resistir una carga vertical mediante compresión, principalmente axial. (F. Ching 2004)

Arco funicular:

Arco configurado de manera que, bajo la acción de una carga dada, sólo se desarrollen compresiones axiales. Esta forma puede ser determinada invirtiendo la forma funicular de un cable sometido a cargas similares. (F. Ching 2004)

Armadura:

Conjunto de barras rígidas que forma una viga, y está sometida a fuerzas axiales proporcionales a la altura de la cercha. Por lo general, el dimensionado de las barras a compresión está regido por el pandeo, mientras que el dimensionado de las barras a tracción depende de los esfuerzos de tracción en los puntos más débiles, localizados generalmente en las uniones. (F. Ching 2004)

Bambú:

Planta de la familia de las gramíneas, originaria de la India, con tallo leñoso de hasta 20 m de altura, cuyas cañas, aunque ligeras, son muy resistentes y se emplean en la construcción y en la fabricación de muebles y otros objetos. (Real Academia Española 2017)

Caña de bambú:

Tallo de la planta de bambú que por lo general es hueco y nudoso y está conformado por las siguientes partes:

a) *Nudo: Parte o estructura del tallo que lo divide en secciones por medio de diafragmas.*

b) *Entrenudo*: Parte de la caña comprendida entre dos nudos.

c) *Diafragma*: Membrana rígida que forma parte del nudo y divide el interior de la caña en secciones.

d) *Pared*: Parte externa del tallo formada por tejido leñoso. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú 2009)



Imagen 2: Partes de caña de bambú

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú – *Norma E 100 Bambú*

Carga:

Cualquiera de las fuerzas que actúan sobre una estructura o un elemento estructural. (F. Ching 2004)

Catenaria:

Es la curva que adopta un cable uniforme y perfectamente flexible, suspendido desde dos puntos situados a la misma altura. (Ching, Onouye and Zuberbuhler 2014)

Cercha:

Armazón estructural basado en la rigidez geométrica de la figura del triángulo, compuesto de elementos lineales -llamados barras- sometidos únicamente a esfuerzos axiales de tracción o de compresión. (F. Ching 2004)

Cercha plana:

La que tiene todas sus barras en un mismo plano. (F. Ching 2004)

Colapso estructural:

Cualquier condición que, como la rotura, el pandeo o la deformación plástica, incapacita a la estructura, pieza o junta para cumplir la función portante para la que ha sido proyectada. (F. Ching 2004)

Compresión:

Presión a que está sometido un cuerpo por la acción de fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen. (Real Academia Española 2017)

Concentrada (carga):

Aquella cuya superficie de contacto con el miembro que la resiste es despreciable con relación al área del mismo. (Seely and Smith 1974)

Cortante:

adj. Que corta. (Real Academia Española 2017)

Culmo (Caña de bambú):

Tallo herbáceo articulado, propio de las gramíneas. (Diccionario Enciclopédico Vox 1 2009)

Cúpula geodésica:

Cúpula de estructura de acero cuyos nervios siguen las líneas de tres juegos principales de círculos máximos que se cortan a 60°, subdividiendo la cúpula en una serie de triángulos esféricos equiláteros. (F. Ching 2004)

Descuelgue:

Se refiere a la distancia vertical entre los apoyos y el punto más bajo de la estructura tensada. (Ching, Onouye and Zuberbuhler 2014)

Distribuida (carga uniformemente):

Un volumen de grano de forma regular sobre un piso de manera que su altura sea constante. (Seely and Smith 1974)

Elemento estructural:

Cada una de las partes constituidas en que puede ser resuelta por análisis una estructura, caracterizadas por tener un carácter unitario y mostrar un único comportamiento bajo la acción de una carga aplicada. (F. Ching 2004)

Esterilla:

Son tableros que se obtienen de la parte intermedia de la caña de bambú, que se abre manualmente formando una superficie plana. (Lucila Aguilar Arquitectos 2017)

Estructura:

Conjunto estable de elementos estructurales proyectados, calculados y construidos para funcionar unitariamente en el sostenimiento y la transmisión de las cargas al terreno, en condiciones de seguridad y sin sobrepasar los esfuerzos admisibles en sus miembros (F. Ching 2004)

Estructura de forma activa:

Dícese de la estructura o elemento estructural que transmite las fuerzas externas basándose principalmente en la forma de su material, como un arco o un cable. (F. Ching 2004)

Estructura vectorial activa:

Dícese de la estructura o elemento estructural que transmite las fuerzas externas aplicadas basándose principalmente en la organización de barras que trabajan a tracción o a compresión, como una cercha. (F. Ching 2004)

Estructura superficial activa:

Dícese de la estructura o elemento estructural que transmite las fuerzas externas aplicadas basándose principalmente en la continuidad de una superficie, como una placa o una estructura laminar. (F. Ching 2004)

Flexión:

Encorvamiento transitorio que experimenta un sólido elástico por la acción de una fuerza que lo deforma. (Real Academia Española 2017)

Fuerza:

Acción sobre un cuerpo que produce o tiende a producir un cambio de forma o movimiento. (F. Ching 2004)

Geometría:

Estudio de las propiedades y de las magnitudes de las figuras en el plano o en el espacio. (Real Academia Española 2017)

Geometría euclidiana:

Geometría basada en el postulado de Euclides, según el cual por un punto del plano no puede trazarse más que una recta paralela a una recta dada. (F. Ching 2004)

Inmunizar:

Hacer inmune. (Real Academia Española 2017)

Latas:

Expresión coloquial que se usa para denominar a las fajas de bambú. Segmentos longitudinales de las cañas; se obtienen haciendo cortes paralelos a las fibras, tienen diversas aplicaciones. (Lucila Aguilar Arquitectos 2017)

Leptomorfo:

Grupo de bambús conformado por especies que se dan en zonas templadas o frías. Sus rizomas tienen forma cilíndrica o casi cilíndrica. (Coto 1991)

Malla Espacial:

Estructura tridimensional basada en la rigidez del triángulo y compuesta de elementos lineales sujetos únicamente a esfuerzos axiales de tracción o de compresión. La unidad espacial más simple de una estructura espacial es el tetraedro, que está compuesto de cuatro nudos y seis barras. Al igual que en las estructuras de placa, es conveniente que la planta cubierta por una malla espacial sea cuadrada o casi cuadrada, para asegurar que la malla se comporte como una estructura bidireccional. (F. Ching 2004)

Módulo:

Dimensión que convencionalmente se toma como unidad de medida, y, más en general, todo lo que sirve de norma o regla. Pieza o conjunto unitario de piezas que se repiten en una construcción de cualquier tipo, para hacerla más fácil, regular y económica. (Real Academia Española 2017)

Nudo:

Unión entre dos o más barras de una cercha. Para que la cercha esté sometida únicamente a esfuerzos de tracción o compresión, las cargas deben aplicarse siempre en los nudos. (F. Ching 2004)

Paraboloide:

Superficie caracterizada porque todas sus secciones planas son o bien parábolas y elipses, o bien parábolas e hipérbolas. (F. Ching 2004)

Paraboloide hiperbólico:

Superficie engendrada deslizando una parábola con la concavidad hacia abajo a lo largo de otra parábola con la concavidad hacia arriba, o deslizando un segmento recto con sus extremos apoyados sobre dos líneas oblicuas. El paraboloide hiperbólico, a la par que una superficie de traslación puede ser considerado como una superficie reglada. (F. Ching 2004)

Paquimorfo:

Grupo de bambús conformado en su mayoría por especies tropicales. Sus rizomas son cortos y gruesos con internudos asimétricos (más anchos que largos) y sólidos con raíces. (Coto 1991)

Peralte:

Parte que en la altura de un arco, bóveda o armadura excede al semicírculo. (Real Academia Española 2017)

Pimboo:

*Nombre coloquial que se le da al tablero conformado por latas de bambú preservadas de 0.10 m de ancho, cepilladas y sin nudos, unidas entre sí con pines de madera tratada o varillas roscadas \varnothing 1/2". *redacción propia en base a (Lucila Aguilar Arquitectos 2017)*

Resistencia:

Fuerza que se opone a la acción de otra fuerza. (Real Academia Española 2017)

Riostra:

Elemento estructural para mantener en posición, sostener, reforzar o fijar los miembros de un pórtico o marco estructural. (F. Ching 2004)

Riostrar (Arriostrar):

Poner riostras a una estructura. (Real Academia Española 2017)

Shou sugi ban:

Ver término "yakisugi"

Taxonomía:

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. (Real Academia Española 2017)

Tensión:

Fuerza de tracción a la que está sometido un cuerpo. (Real Academia Española 2017)

Tracción:

Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a alargarlo. (Real Academia Española 2017)

Torción:

Acción y efecto de torcer o torcerse. (Real Academia Española 2017)

Torción (cargas de):

Las fuerzas que hacen que una barra se tuerza alrededor de su eje central. (Seely and Smith 1974)

Unión:

Acción y efecto de hacer solidarias dos o más partes o miembros, por ejemplo, sujetándolas con una abrazadera mecánica, clavo o tornillo, pegándolas con un adhesivo o soldándolas. (F. Ching 2004)

Viga:

Miembro estructural rígido, generalmente horizontal, proyectado para soportar y transmitir las cargas transversales a que está sometido hacia los elementos de apoyo. (F. Ching 2004)

Viga de alma abierta (“Joist”):

Viga de acero con el alma aligerada que se emplea para economizar acero cuando la flexión predomina sobre el esfuerzo cortante, es decir, cuando se trata de luces grandes y cargas moderadas. Existen varios tipos, entre ellos, la obtenida de un perfil normal cortado y vuelto a soldar (viga alveolada); formado por la unión de cuatro perfiles y un redondo o pletina dispuesto en zigzag que se suelda alternativamente al ala superior e inferior. (F. Ching 2004)

Yakisugi [焼杉] (comúnmente mal llamado “Shou Sugi Ban”)

Palabra japonesa representada por caracteres chinos llamados “Kanji”, para referirse a la técnica japonesa de preservación de madera, específicamente en

*delgadas planchas de ciprés porosa, aplicadas en muros, cercas, cielos falsos. Siendo su significado literal <ciprés quemado>, el cual se explica a continuación: 焼 o “yaki” = quemado, frito, asado, tratamiento de calor, etc. Y 杉 o “sugi” = ciprés en relación con “Cryptomeria japónica”, también llamado cedro en el oeste.
traducción propia de (Beleck 2019)

FUNDAMENTO ESTRUCTURAL

Tipología de sistemas estructurales con potencial para usar bambú

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTRUCTURAS

Con la finalidad de comprender las tipologías estructurales y determinar en cuáles el bambú se ajusta y para trabajar adecuadamente potenciando las capacidades del mismo, a continuación, se profundiza en el análisis de los sistemas y tipologías que propicien la implementación del bambú como estructura portante.

Estructura: Es un conjunto de elementos resistentes convenientemente vinculados entre sí que accionan y reaccionan bajo las cargas de servicio. (Diez 2005)

Según Heino Engel, existen diferentes sistemas de estructuras, los cuales se clasifican, según su funcionamiento básico, en 5 grandes grupos, siendo estos:

- *Estructuras de forma activa, el bambú es utilizado bajo esta tipología por lo que se ampliará su información.*
- *Estructuras de vector activo, también se ajusta dentro de la tipología en que normalmente se trabaja el bambú, por lo que se ampliará su información.*
- *Estructuras de sección activa,*
- *Estructura de superficie activa, y*
- *Estructura de altura activa. (Engel 2003)*

ESTRUCTURAS DE FORMA ACTIVA

“Material no rígido y flexible, con una forma determinada y fijado por sus extremos, puede sostenerse por sí mismo y cubrir un espacio” (Engel 2003), para el autor reúnen 2 características distintivas:

1) desvían las fuerzas exteriores a través de fuerzas normales de compresión (arco funicular) y tracción (cable suspendido).

2) Trabajan como arco funicular o cable suspendido.

Al estar sometidos a esfuerzos de compresión o tracción simple permiten cubrir un espacio con la mínima cantidad de material.

Las variantes de estructuras de forma activa se subdividen en 4 grupos, que a la vez se subdividen en variantes según su utilización o disposición del elemento estructural, Los grupos son:

- Estructuras de cables (cubren luces desde 50 m hasta 500 m según su disposición y material).
- Estructuras de forma de tienda (cubren luces desde 10 m hasta 80 m según su disposición y material).
- Estructuras neumáticas (cubren luces desde 10 m hasta 220 m según su disposición y material).
- Estructuras de arcos (cubren luces desde 8 m hasta 90 m, según su disposición y material), el uso de este grupo es bastante común en el desarrollo de construcciones de bambú, por lo que se estudiará y analizará con mayor énfasis para desarrollar una metodología de aplicación.

Estructuras de arco (arco funicular)

Se encuentra relacionado directamente con el cable suspendido a diferencia de los arcos que trabajan a compresión y los arco a tracción. El arquitecto catalán Antoni Gaudí empleo el diseño estructural de la iglesia dedicada a la Sagrada Familia por medio de cables suspendidos con pesos trabajando a tracción, que después giró 180 grados para convertir los cables en arcos funiculares que trabajan a compresión. A continuación, se describen con base en el libro de Heino Engel, las recomendaciones generales para el diseño y usos del arco funicular, sin tomar en cuenta un material específico.

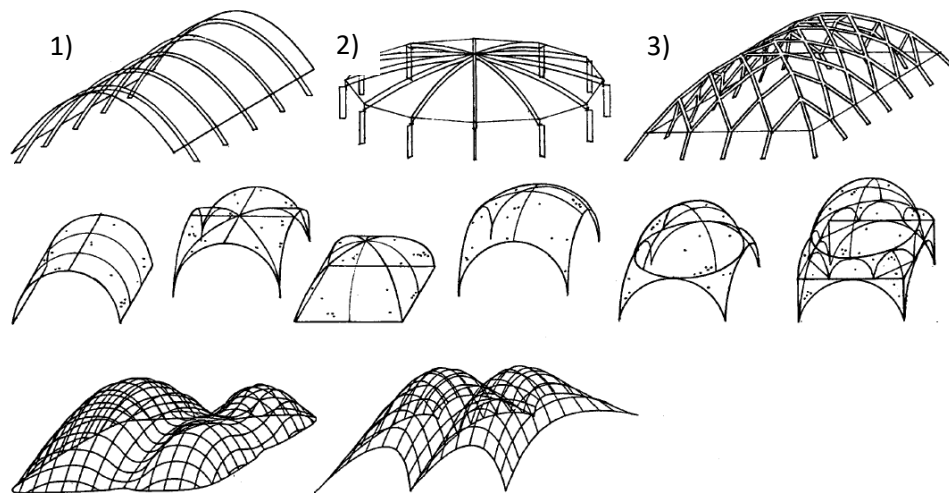


Imagen 3: Estructuras de arcos, 1) Arcos lineales, 2) Bóvedas 3) Retículas abovedadas.
Fuente: Engel (2003)

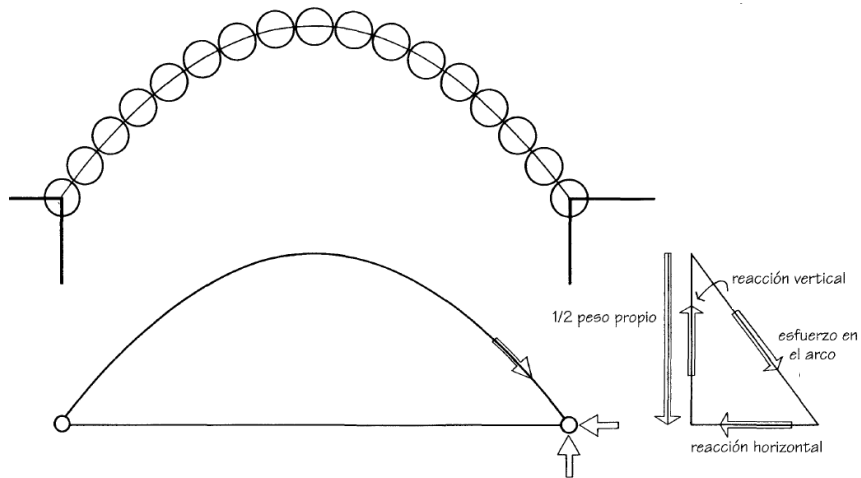


Imagen 4: Arco funicular.
Fuente: Engel (2003)

Los momentos actuantes presentes en el arco funicular permiten equilibrar el arco eliminando la flexión.

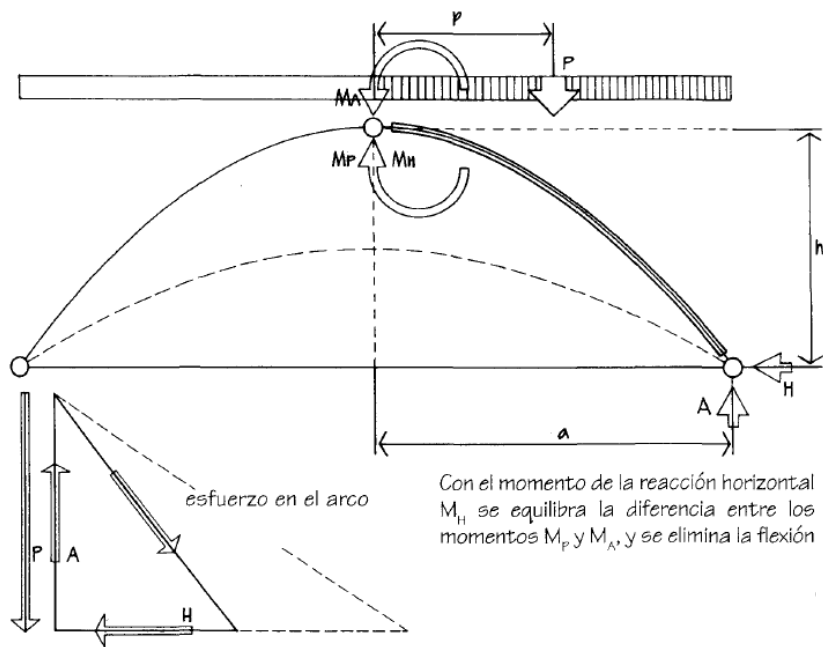


Imagen 5: Mecanismo de palanca del arco funicular.
Fuente: Engel (2003)

El arco adquiere formas geométricas de acuerdo con el tipo de carga a la que podría estar sometido, siendo estas: peso propio, cargas lineales uniformemente distribuidas o cargas puntuales.

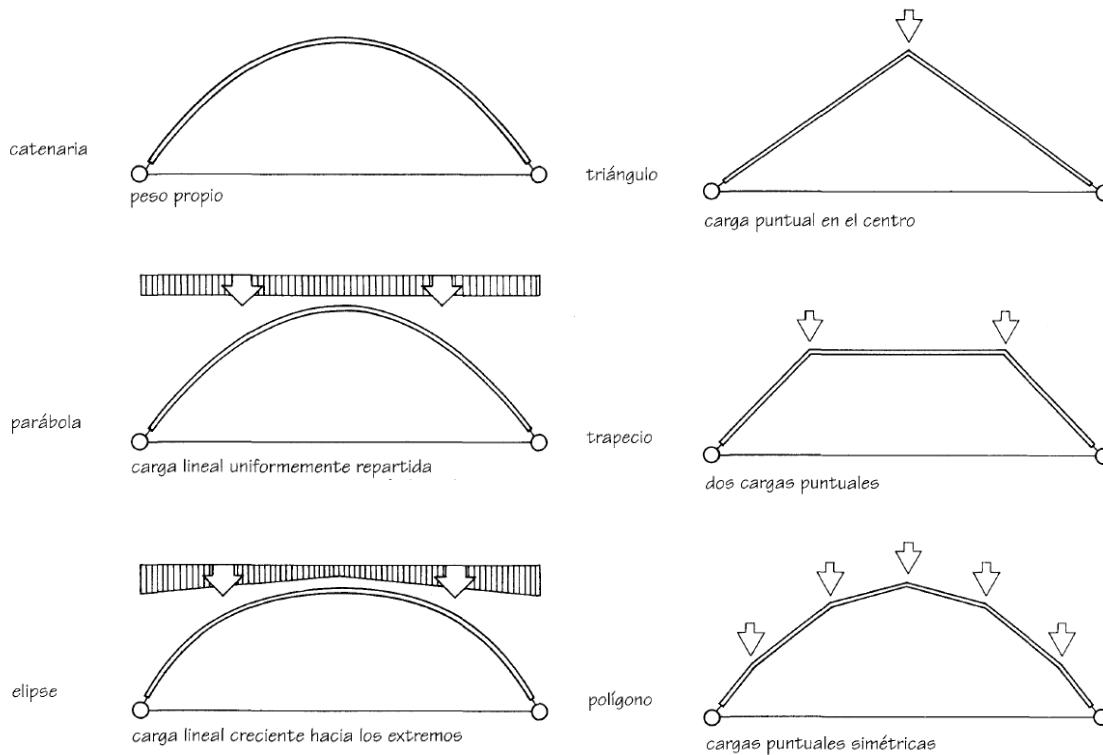


Imagen 6: Formas que adquiere el arco funicular según el tipo de carga.
Fuente: Engel (2003)

Para absorber y minimizar el empuje horizontal característico del arco funicular se recurre a varias alternativas como: anclarlo al suelo, ubicarlo en sucesión de arcos, con contrafuertes o atirantando el arco.

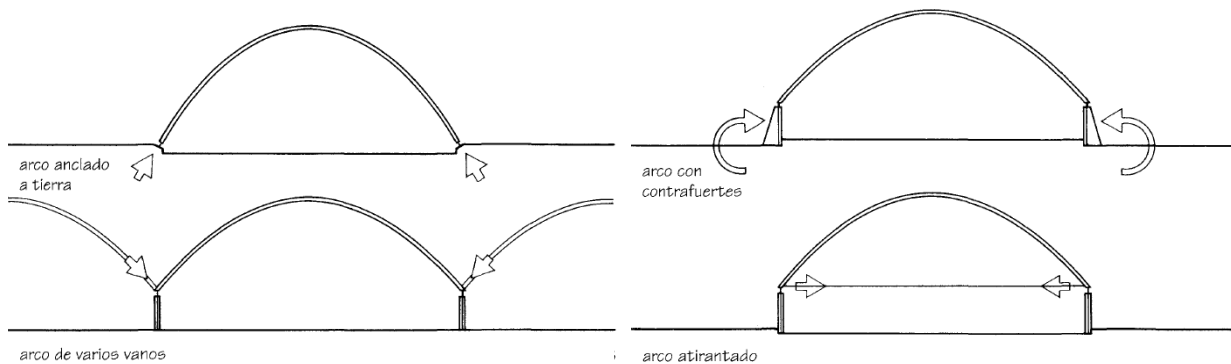


Imagen 7: Absorción de empujes horizontales en el arco funicular.
Fuente: Engel (2003)

Con respecto a la altura del arco y la influencia que esta ejerce en los puntos de apoyos, se determinó que las reacciones en los apoyos son inversamente proporcionales a la altura, por lo que se recomienda que el arco sea lo más alto posible para reducir las reacciones en los apoyos.

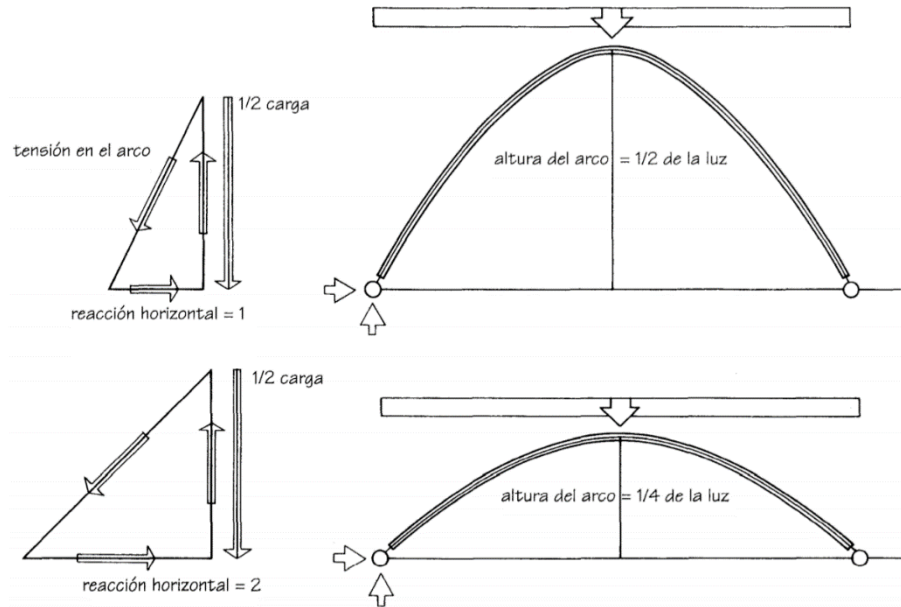


Imagen 8: Relación altura del arco funicular vs. reacción horizontal.

Fuente: Engel (2003)

El arco funicular sufrirá de flexiones, las cuales tienen relación directa con los factores externos que actúan sobre el arco, entre los principales generadores de flexión en un arco funicular se pueden listar los siguientes:

- Las cargas sometidas al centro del arco generan desplazamientos que provocan la elevación o el descenso.
- Empujes horizontales (viento) y cargas verticales (peso de nieve, ceniza) que modifiquen la forma del arco.
- Cambios térmicos ya sean por dilatación o contracción de los materiales.
- Asentamientos de la cimentación.
- La presencia de una tercera articulación en el arco modifica el comportamiento de este, respecto a los efectos de tensión que actúan en el mismo.

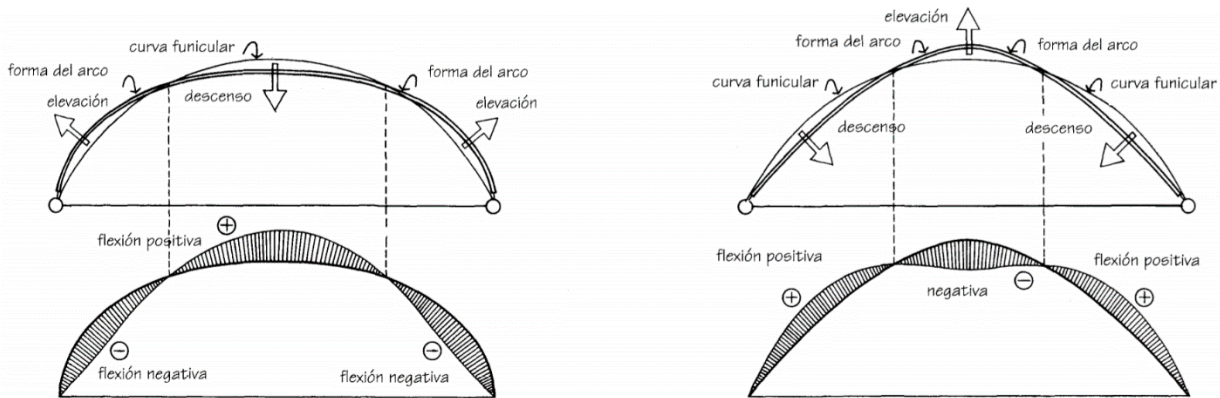


Imagen 9: Desplazamiento del arco funicular según los factores externos.

Fuente: Engel (2003)

ESTRUCTURAS DE VECTOR ACTIVO

“Conjunto de barras cuya eficacia se basa en el comportamiento conjunto de los diferentes elementos que trabajan a tracción o a compresión” (Engel 2003), para el autor poseen dos características principales, siendo estas:

- 1) La triangulación de las estructuras, debido a que la forma básica de la misma es el triángulo.
- 2) Uniones de las barras mediante nudos.

Ambas de aplicación idónea para resolver técnicamente la construcción de espacios tridimensionales a escala urbana.

Las variantes de estructuras de vector activo se subdividen en 4 grupos, que a la vez se subdividen en variantes según su utilización o disposición del elemento estructural, Los grupos son:

- Cerchas planas, (cubren luces desde 10 m hasta 80 m según su disposición y material), grupo con amplia aplicación para realizar cubiertas de bambú, por lo que se estudió y analizó para implementarlo con bambú.
- Cerchas planas combinadas, (cubren luces desde 12 m hasta 100 m según su disposición y material), la diferencia entre este grupo y el anterior radica en los apoyos. En el primero, el sistema trabaja independientemente, mientras en segundo la cercha y la columna trabajan de forma unificada.
- Cerchas curvas, (cubren luces desde 12 m hasta 190 m según su disposición y material), grupo al que pertenecen las geodésicas, el bambú es aplicado en este sistema estructural.
- Mallas espaciales (cubren luces desde 15 m hasta 120 m, según su disposición y material), grupo con alto potencial de implementación en

construcciones de bambú, por lo que se estudió y analizó para implementarlo con bambú.

Cerchas planas:

Para que un bastidor con cuatro barras alcance un equilibrio real (descartando el teórico), es necesaria la implementación una quinta barra en diagonal, con lo que el cuadrado se rompe formando dos triángulos, cumpliendo la característica más importante de las estructuras de vector activo “la triangulación”. A continuación, se describen con base en el libro de Heino Engel, las recomendaciones generales para el diseño y usos de las cerchas planas, cabe destacar que las mismas aplican al grupo de LAS CERCHAS PLANAS COMBINADAS, sin tomar en cuenta un material específico.

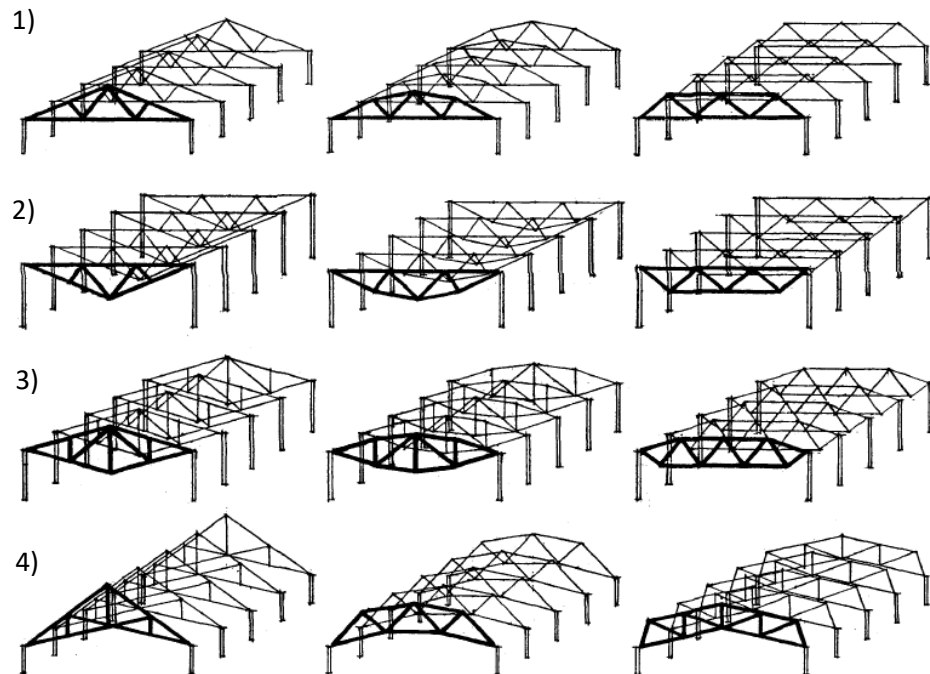


Imagen 10: Cerchas planas 1) de cordón superior, 2) de cordón inferior 3) de dos cordones 4) sobreelevados

Fuente: Engel (2003)

La altura de la cercha es inversamente proporcional a los esfuerzos a los que está sometida, por lo que se recomienda trabajar las mayores alturas posibles en el canto de la cercha, logrando con ello reducir los esfuerzos a los que está sometida.

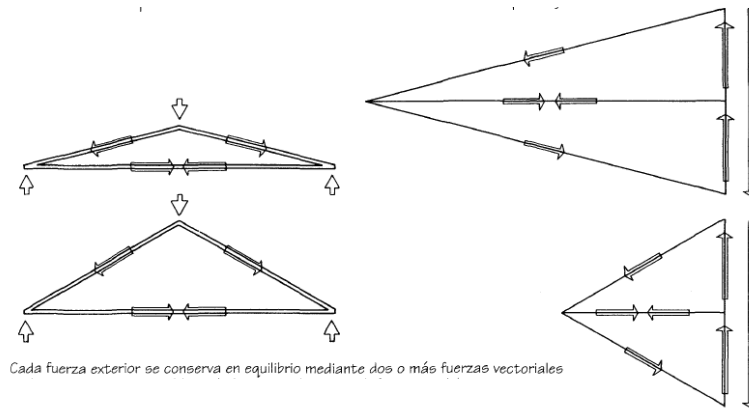


Imagen 11: Influencia de la altura vs. los esfuerzos en las barras de la cercha plana.
Fuente: (Engel 2003)

El número de divisiones en la cercha juega un papel importante en el comportamiento del cordón superior, por lo que a mayor número de divisiones se reducen las longitudes de pandeo del cordón superior.

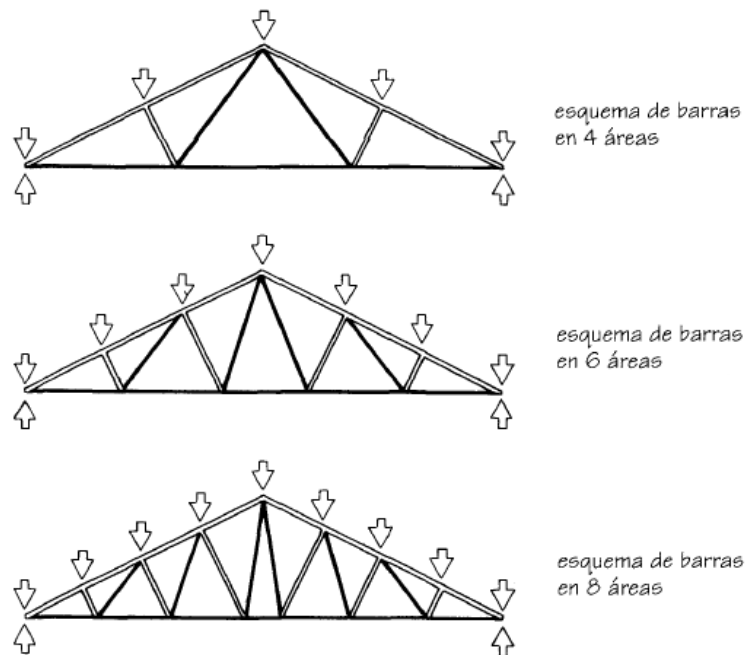


Imagen 12: A mayor número de barras se reducen los esfuerzos en el cordón superior.
Fuente: Engel (2003)

Las ubicaciones de las barras en la cercha cumplen la función de distribuir las tensiones en los nudos.

Según el perfil de la cercha, esta tiene influencia sobre los cordones y las barras.

Cerchas curvas:

Dentro de las mallas espaciales se encuentra la cúpula geodésica, la cual es una derivación geométrica de figuras geométricas como:

- Icosaedro: conformado por 20 triángulos equiláteros.
- Icosaedro esférico: conformado por 20 triángulos idénticos.
- Difusión angular en partes iguales; conformada por 60 triángulos idénticos formados por 15 grandes círculos.

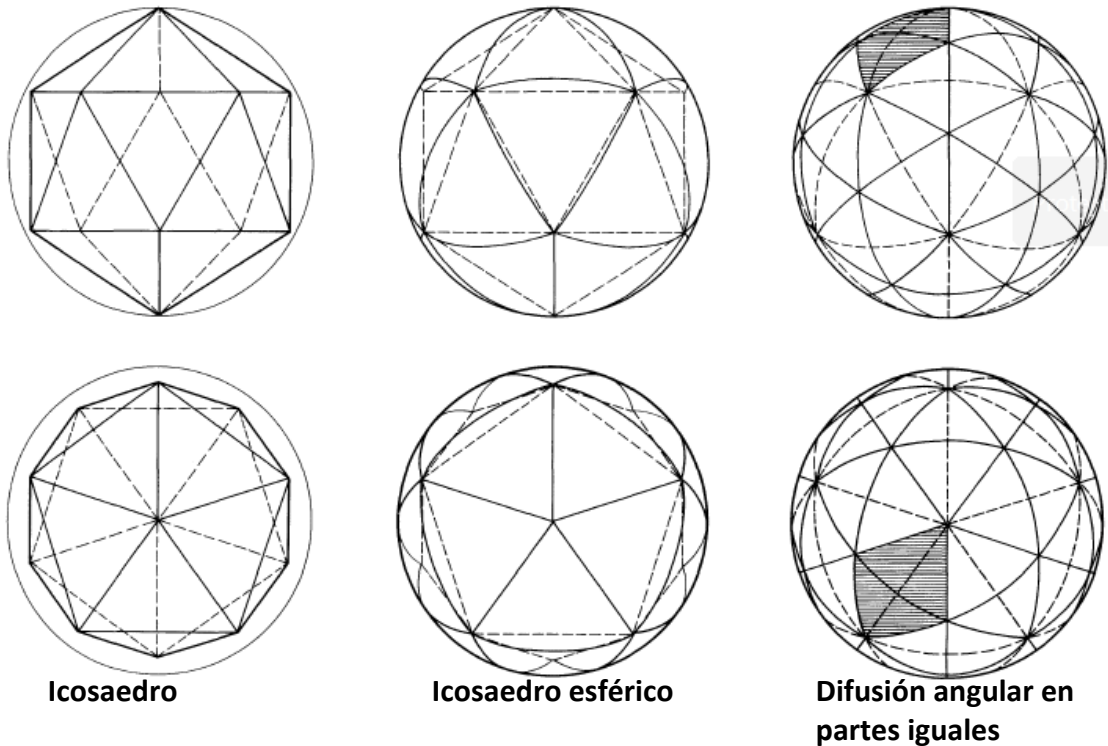


Imagen 13: Mallas típicas para las cúpulas geodésicas.

Fuente: Engel (2003)

Dentro de las mallas típicas usada en las cúpulas geodésicas se encuentran:

Malla triangular

Malla semiromboidal

Malla romboidal

Malla hexagonal

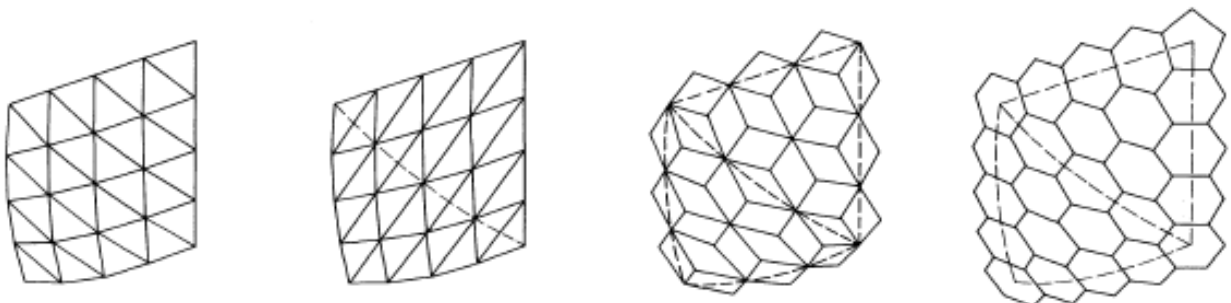


Imagen 14: Mallas típicas para las cúpulas geodésicas.

Fuente: Engel (2003)

Mallas espaciales:

Sistema estructural que se forma al unir varias cercas combinadas, de deriva el nombre de un determinado sistema al formar una malla.

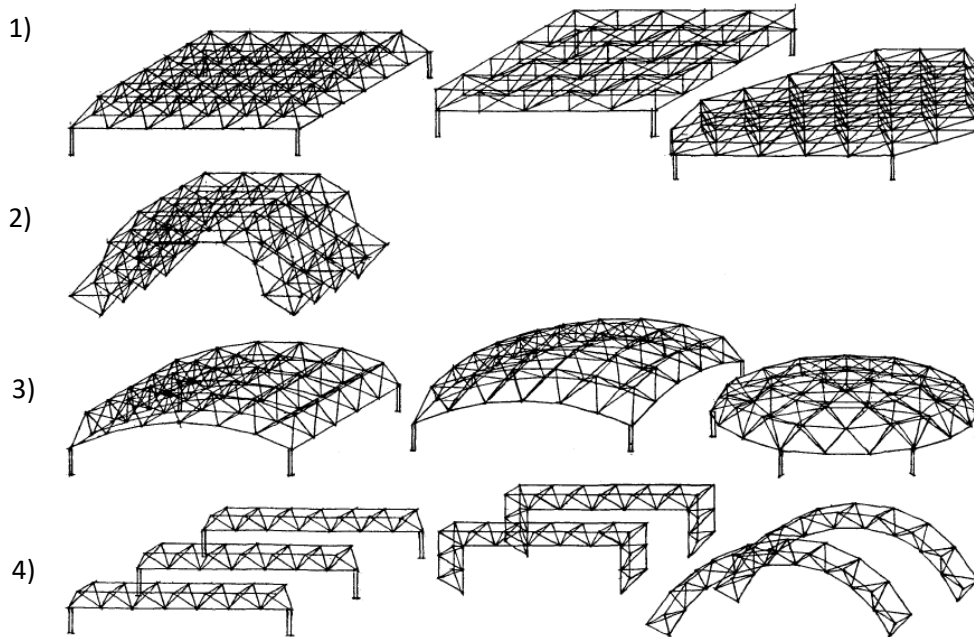


Imagen 15: Mallas espaciales 1) sistemas planos, 2) sistemas plegados 3) sistemas curvos 4) sistemas lineales
Fuente: Engel (2003)

Las cerchas paralelas aumentan la eficiencia al compartir la carga de la estructura, por lo que, el uso de cerchas combinadas convierte a la estructura en una malla espacial con la que se alcanza la máxima eficiencia del sistema.

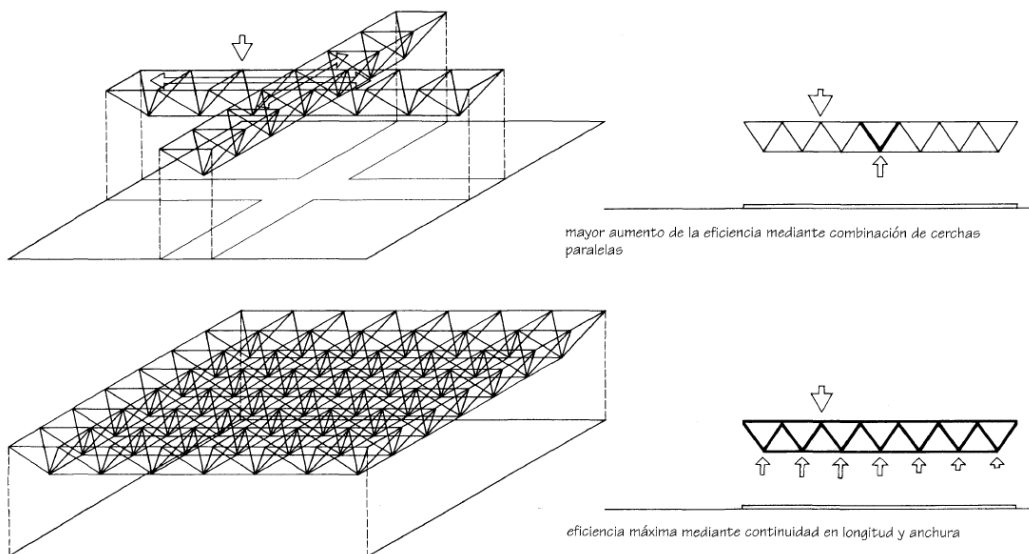


Imagen 16: Aumento de la eficiencia al aumentar la continuidad en los ejes.
Fuente: Engel (2003)

Al igual que en la cercha plana, en la malla espacial se deben usar barras diagonales como arriostramiento en los prismas rectangulares y prismas triangulares que conforman la malla espacial.

También en las mallas espaciales se pueden utilizar otras formas poligonales para formar la estructura, entre ellas las más utilizadas son:

- Combinación de tetraedros y semioctaedros
- Combinación de tetraedros y octaedros
- Pirámide hexagonal
- Pirámide hexagonal invertida
- Combinación de 2 retículas hexagonales diferentes
- Combinación de 2 retículas triangulares contrapuestas
- Combinación de 1 retícula hexagonal y 1 retícula triangular.

La clasificación de los sistemas estructurales puede variar según el autor que se consulte, para profundizar en el tema se consultó a Fuller Moore, quien clasifica a las estructuras de vector activo como:

SISTEMAS ARMADOS

Definiéndolas como: “*ensambles de tirantes (que trabajan en tensión) y puntuales (que trabajan en compresión) configurados en triángulos con juntas articuladas de manera que todas las fuerzas internas sean axiales (en compresión directa o tensión sin flexión o cortante)*” (Moore 2001) Para el autor los sistemas armados cumplen las siguientes características:

- 1) La geometría triangular es fundamental, por ser el triángulo y figuras derivadas las únicas figuras inherentemente estables.
- 2) Al trabajar juntas articuladas se permite que los lados deban resistir esfuerzos de tensión y compresión. Además, agrupa los siguientes sistemas estructurales en sistemas armados:
 - Cables arriostrados, el bambú puede ser aplicado en este sistema en la construcción de puentes.
 - Armaduras, el bambú tiene mayor potencial de aplicación en este sistema, por lo que se estudió.
 - Marcos espaciales, al igual que en las armaduras, el bambú tiene alto potencial de aplicación, por lo que se estudió.
 - Geodésicos, Si bien se puede aplicar el bambú, la forma específica del sistema restringe su aplicación.

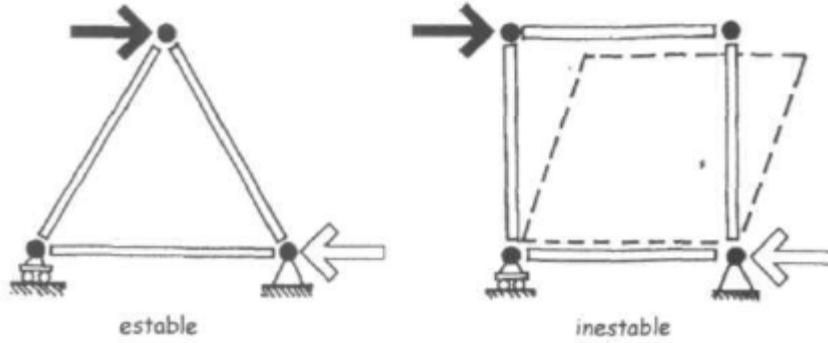


Imagen 17: Estabilidad del triángulo como figura articulada.
Fuente: Moore (2001)

Armaduras

Entendiendo las armaduras como: “... ensambles triangulares que distribuyen cargas a los soportes por medio de una combinación de miembros conectados por juntas articuladas, configurados en triángulos, de manera que idealmente todos se encuentren trabajando en compresión o en tensión pura (sin flexión o cortante) y que todas las fuerzas de empuje se resuelvan internamente” (Moore 2001)

Los elementos que componen una armadura son:

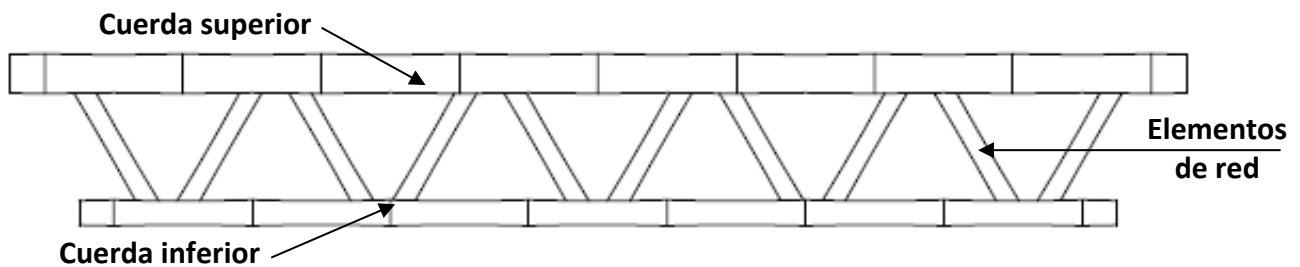


Imagen 18: Elementos de una armadura / joist.
Fuente: Elaboración propia con base en Moore.

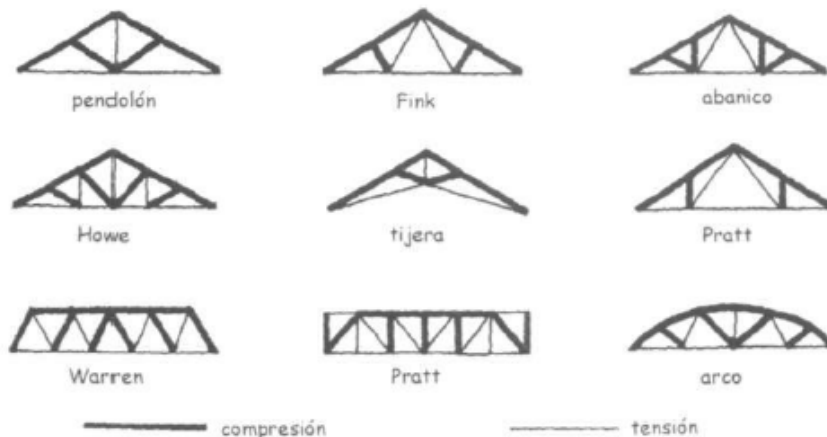


Imagen 19: Tipos de armaduras.
Fuente: Moore (2001)

Según el autor las principales características que presentan las armaduras son:

- 1) Salvan claros solo en una dirección.
- 2) Usan ensambles triangulares.
- 3) Las juntas se comportan como articuladas.
- 4) En armaduras planas todos los miembros están ubicados en un solo plano.
- 5) En armaduras tridimensionales los miembros se configuran en 3 dimensiones, siendo muy común emplear la sección transversal triangular.

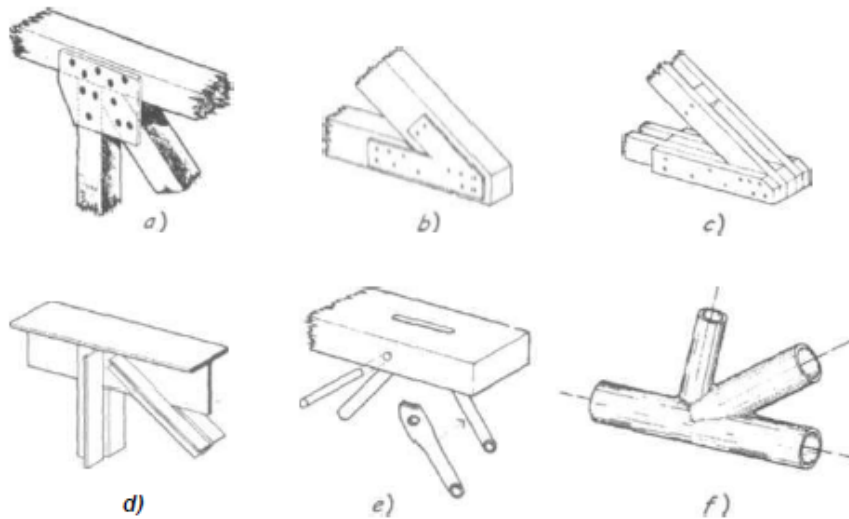


Imagen 20: Juntas de las armaduras.

Fuente: Moore (2001)

Por las formas perimetrales de la mayoría de las armaduras planas, las armaduras se pueden agrupar en:

- Triangulares.
- Rectangulares.
- Arqueadas (curvadas en la parte superior e inferior).
- Lenticulares (curvadas arriba y abajo).

Marcos espaciales

Por marco espacial se entiende un “sistema de armadura tridimensional que salva claros en dos direcciones, cuyos miembros solo están en tensión o compresión”. (Moore 2001)

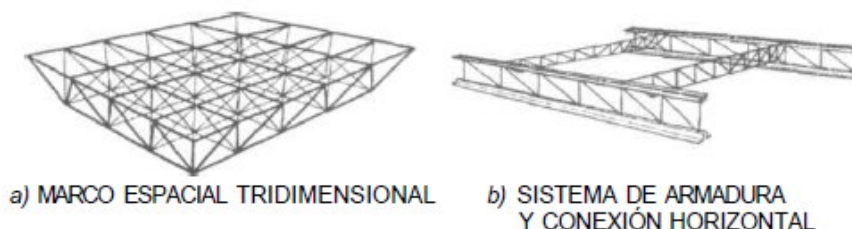


Imagen 21: Comparación entre sistemas estructurales.

Fuente: Moore (2001)

Habitualmente se usan, el octaedro (pirámide de 4 lados) y el tetraedro (pirámide de 3 lados), se adaptan a diversas configuraciones incluyendo muros y techos inclinados y curvados.

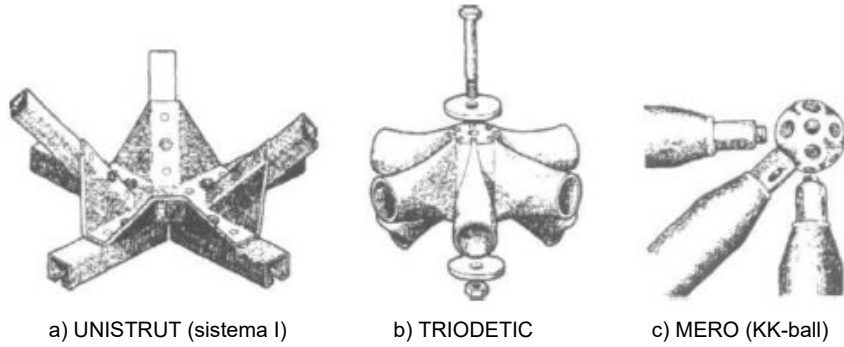
El peralte más económico es el que está cerca del 5% del claro directo u 11% del claro en voladizos. El tamaño del módulo más económico es el que está entre un 7% a 14% del claro.

Los marcos tridimensionales son más eficientes y seguros en los cuales las cargas se soportan en partes por cada cuerda y elemento de la red en proporción con la resistencia de cada uno. Si se quitará uno de los elementos del sistema los demás compartirían proporcionalmente a su capacidad sin afectar la estabilidad del sistema. La carga recorrerá las rutas más rígidas a los distintos soportes con la mayoría de la carga desviándose alrededor de los miembros más flexibles.

Conexiones

Debido a la configuración tridimensional de los elementos, los nodos resultan inherentemente complejos, por lo anterior se recomienda lo siguiente:

- En claros pequeños los nodos se pueden estampar en una placa de acero y colocar pernos en los extremos de los miembros.
- En claros más grandes el sistema más común es el tipo Mero consistente en elementos tubulares atornillados en nodos esféricos sólidos.
- Por tratarse de geometrías complejas de las conexiones, los marcos tridimensionales y de las fuerzas presentes el acero y el aluminio son los materiales más usados.



a) UNISTRUT (sistema I)

b) TRIODETIC

c) MERO (KK-ball)

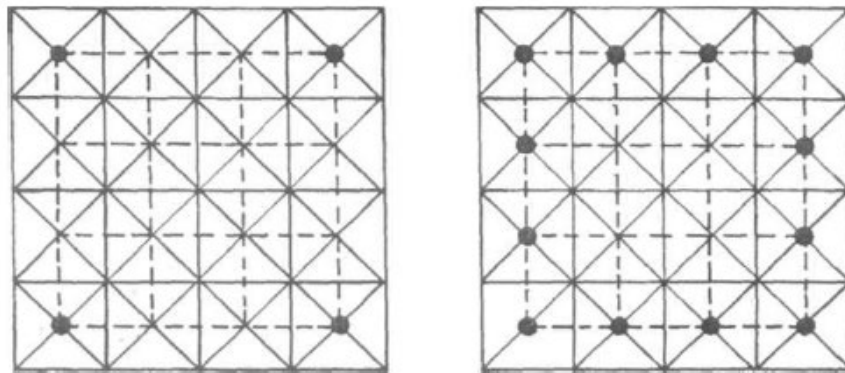
Imagen 22: Tipos de conexiones.

Fuente: Moore (2001)

Apoyos

Las fuerzas más grandes se concentran en los elementos que rodean al soporte, por lo que es recomendable aumentar la sección transversal de los miembros cerca del apoyo.

Se necesitan al menos 3 apoyos, por lo general se colocan 4 apoyos en el sistema, A mayor número de apoyos se mejora la eficiencia del sistema.



a) APOYOS EN LAS ESQUINAS

b) APOYOS EN EL PERÍMETRO

Imagen 23: Apoyos, para alcanzar la eficiencia económica de debe evaluar el número.

Fuente: Moore (2001)

Domos geodésicos:

Es un marco espacial esférico en el cual se distribuyen las cargas a través de un sistema de elementos lineales, configurados en un domo esférico donde todos sus elementos están sometidos a un esfuerzo directo (tensión o compresión). (Moore 2001)

La geometría de los domos geodésicos se basa en los cinco poliedros platónicos: tetraedro (4 caras), cubo (6 caras), octaedro (8 caras), dodecaedro (20 caras) e icosaedro (20

caras), siendo únicamente en estos 5 poliedros en los cuales todas sus caras son polígonos regulares, todas sus aristas son iguales y un mismo número de caras convergen en cada vértice (punto). (Moore 2001)

Geometría

Los domos geodésicos se desarrollan subdividiendo uno o más de los sólidos platónicos... Cuanto mayor sea la frecuencia de las divisiones, más uniforme será el domo resultante. (Moore 2001)

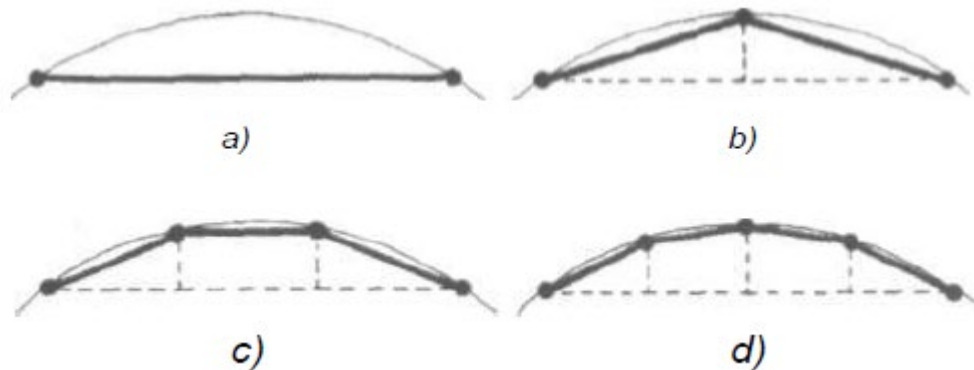


Imagen 24: Subdivisión de una forma geométrica a) lado original poliedro platónico, b) dos frecuencias, c) tres frecuencias y d) cuatro frecuencias.

Fuente: Moore (2001)



Imagen 25: Subdivisión de un lado geodésico triangular.

Fuente: Moore (2001)

Estructuralmente los domos geodésicos se comportan tanto a compresión como a tensión dependiendo del elemento y la sección que se evalúe, para Moore las cargas se transfieren a la cimentación por las fuerzas axiales (tensión y compresión) sobre los miembros de la estructura... todos los elementos superiores (aquellos con ángulos mayores de aproximadamente 45°) estarán en compresión; los miembros con ángulos más pequeños casi horizontales estarán en tensión, mientras que los miembros casi verticales estarán a compresión. (Moore 2001)

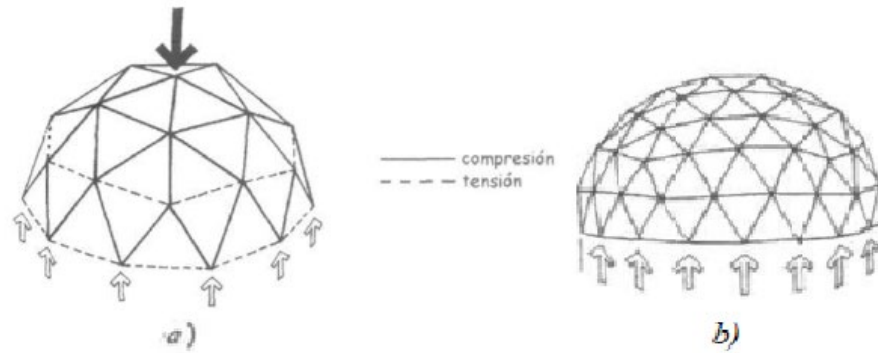


Imagen 26: Distribución de cargas en domos geodésicos: a) esfuerzos de tensión y compresión, b) reacciones de los soportes en un domo hemisférico.
 Fuente: Edición propia con base en Moore.

Con respecto a la efectividad estructural de los domos geodésicos, *las cargas concentradas se resisten por la distancia relativa de dos cuerdas adyacentes de la armadura. A medida que la frecuencia se incrementa el peralte de la armadura disminuye junto con la resistencia a las cargas concentradas... Los domos de una sola capa (sin peralte de la superficie) se limitan a claros de aproximadamente 30 m. En domos mayores se emplea una configuración de marco tridimensional de capa doble.* (Moore 2001)

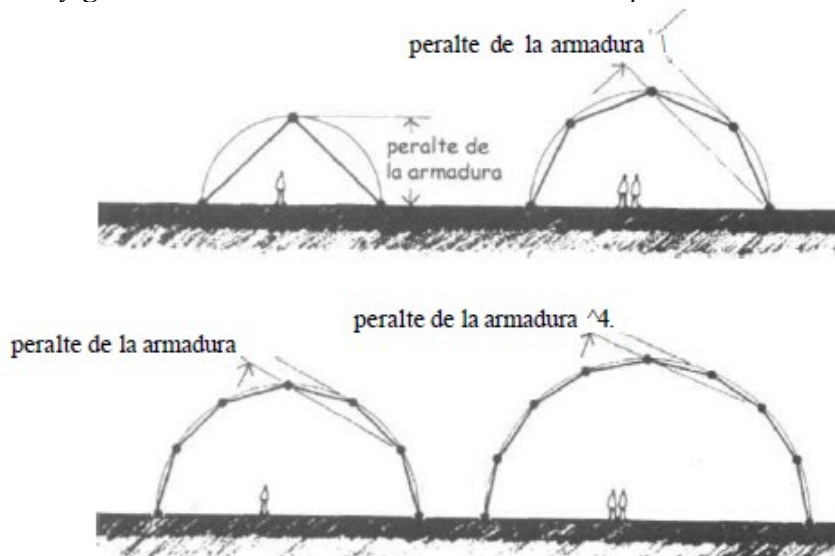


Imagen 27: Relación inversamente proporcional entre peralte y frecuencia de la estructura y relación directamente proporcional entre peralte de estructura y resistencia de la estructura.
 Fuente: Moore (2001)

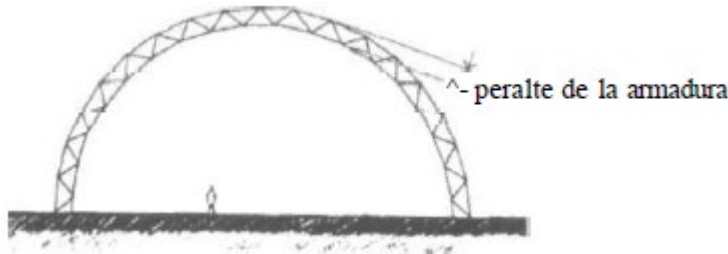


Imagen 28: Incremento de resistencia de la estructura al agregar una segunda capa.
Fuente: Moore (2001)

“Aunque los domos geodésicos son tan atractivos y eficientes desde el punto de vista estructural existen problemas prácticos para su construcción satisfactoria. Es muy difícil construirlos a prueba de agua. Las aberturas para las puertas y ventanas son difíciles de insertar sin alterar la continuidad estructural del domo. La forma interior hace difícil la adaptación de componentes y mobiliario de construcción estándar. Mientras que esto se puede resolver en estructuras grandes, es más difícil hacerlo en pequeñas residencias, donde las desventajas tienden a pesar más que las ventajas estructurales.” (Moore 2001)

Al igual que los marcos espaciales tridimensionales uno de los aspectos de mayor complejidad son las conexiones en los nudos haciéndolos complejos, costosos y muy elaborados, además que arquitectónicamente su forma específica restringe su aplicación a ciertos usos como pabellones temporales de exposición, jardines botánicos, etc.

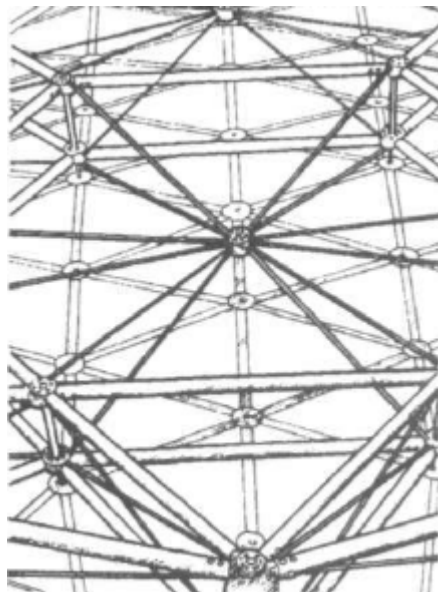


Imagen 29: Detalle del exterior de un panel hexagonal típico de Missouri Botanical Gardens Climatedon.
Fuente: Moore (2001)

SISTEMAS ESTRUCTURALES

	ARCO FUNICULAR			CERCHAS PLANAS / ARMADURAS			MALLAS / MARCOS ESPACIALES			CERCHAS CURVAS / DOMO GEODÉSICO		
	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Máxima luz entre apoyos	De 8 m hasta 90 m en madera	En bambú se puede emplear a un cuarto de la distancia máxima		De 10 m hasta 80 m en madera	En bambú se puede emplear a un sexto de la distancia máxima		De 15 m hasta 120 m en madera	En bambú se puede emplear a un tercio de la distancia máxima		De 12 m hasta 190 m en madera	En bambú se puede emplear a un cuarto de la distancia máxima	
Aplicación de bambú en sistema	Alta aplicación en el sistema	Pueden usarse paquetes de culmos o latas	Mano de obra capacitada	Alta aplicación en el sistema	Normalmente se usan culmos de 2 diámetros	Mano de obra capacitada	Baja aplicación en el sistema	Utilización de segmentos de culmos	Requiere diseño de anclaje en nudos de la red o malla	Mediana aplicación en el sistema	No requiere mano de obra especializada para su armado	
Sistema de anclaje	Soluciones empotradas, ancladas, articuladas	Variedad de soluciones a elegir	Conforme más tecnificada la solución incrementa el costo	Soluciones pernadas, anudadas	Variedad de soluciones a elegir	El anclaje resulta ser el punto más vulnerable	Soluciones empotradas, ancladas, articuladas		Conforme más tecnificada la solución incrementa el costo	Soluciones ancladas, articuladas	Puede ser simplemente apoyado sobre suelo nivelado	
Sistema de unión entre culmos	Pernos roscados, tarugos de bambú o madera dura, sogas o alambre galvanizado	Elementos simples y accesibles		Pernos roscados, tarugos de bambú o madera dura	Elementos simples y accesibles		Anclajes especiales en nudos		Anclaje bajo diseño en acero o aluminio incrementa el costo	Anclajes especiales	Los anclajes especiales permiten su armado y traslado	Anclaje bajo diseño en acero o aluminio incrementa el costo
Factibilidad técnica	De mediana complejidad	Fácil modulación y construcción sin maquinaria compleja	Mano de obra capacitada, requiere gran cantidad de culmos	De mediana complejidad	Fácil modulación y construcción sin maquinaria compleja	Mano de obra capacitada, y cortes específicos	De alta complejidad	Ideal para áreas exteriores	Alta complejidad en unión entre culmos que forman la red	De alta complejidad	Ideal para arquitectura temporal	Complejo sistema para impermeabilizar
Viabilidad económica	Alta viabilidad	ideal para proyectos de pequeñas y grandes áreas	Requiere frecuente mantenimiento preventivo	Alta viabilidad	ideal para proyectos de pequeñas y grandes áreas	Requiere frecuente mantenimiento preventivo	Baja viabilidad	Rentabilidad ideal para proyectos con grandes áreas	Los anclajes especiales en nudos limitan la aplicación del sistema	Mediana viabilidad	Rentabilidad ideal para proyectos con grandes áreas	Los anclajes, y la configuración espacial limitan la aplicación del sistema
Versatilidad arquitectónica	Amplia aplicación del sistema como solución arquitectónica	Fácil adaptación y modulación según el proyecto	Mayor cantidad de culmos	Amplia aplicación del sistema como solución arquitectónica	Variedad de tipos de cerchas de fácil modulación	Limitada configuración ortogonal	Baja aplicación del sistema como solución arquitectónica	Cubren bastante área	Limitada configuración ortogonal	Mediana aplicación del sistema como solución arquitectónica	Sistema autoportante conforma el cerramiento horizontal y vertical	Limitada configuración circular

Tabla 1: Comparativo entre sistemas estructurales analizados y las ventajas y desventajas en bambú.
Elaboración propia.

BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Para analizar la posibilidad de usar el bambú como material de construcción es necesario plantear una breve revisión histórica del bambú en Guatemala, con el fin de establecer antecedentes que permitan formular las bases de información sobre las cuales fundamentar la propuesta técnica del empleo de bambú como elemento estructural aplicado en grandes luces.

Antecedentes del bambú en Guatemala

A continuación, se cita textualmente el *Manual para el cultivo de bambú* desarrollado por el departamento de divulgación del ICTA, que refiere un breve antecedente en el país:

“En Guatemala han existido especies de bambú, las autoridades de la embajada de China en nuestro país detectaron el potencial que el clima y ubicación ofrecían para el cultivo de bambú, por el año 1950 trajeron al doctor taiwanés Wei Chin Lin, experto en bambú, de quien se obtuvieron recomendaciones para la producción, dentro de los usos más comunes que se le daban, era para la fabricación de muebles, construcción de viviendas de interés social. En el año de 2003 en alianza con el Instituto de Ciencia y Tecnología Agraria ICTA, se empieza a intensificar el trabajo con el bambú en nuestro país, el fin de la alianza fue la investigación, recopilación de información y transferencia del conocimiento con los agricultores del país.

*Resultado del trabajo de divulgación y cultivo del bambú para el año 2013 se estimaba que hay 12,000 hectáreas de cultivo en nuestro país, siendo los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez y Escuintla los que reportan mayor cultivo, en parte por su altitud y clima predominante, dentro de las especies que se cultivan están Especies no comerciales como *Bambusa Vulgaris*, y especies comerciales como *Guadua angustifolia*, *Dendrocalamus asper* y *Gigantocloa verticillata*.” (Valdez Cancinos 2013).*

¿QUÉ ES EL BAMBÚ?

El *Diccionario de la Real Academia de la Lengua* la denomina como una planta de la familia de las gramíneas, originaria de la India. Con base a la taxonomía, *“los bambúes pertenecen a la familia Poacea y a la subfamilia Bambusoideae, las cuales se han dividido en dos grandes tribus:*

a) Bambúes herbáceos u Olyrodae y

b) Bambúes leñosos o Bambusodae”. (Valdez Cancinos 2013)

ESPECIES DE BAMBÚ APTAS PARA LA CONSTRUCCIÓN

Con base en la descripción y caracterización que presenta el *Manual para el cultivo de bambú* desarrollado por el ICTA, a continuación, se parafrasean las características de las especies de mayor cultivo y uso en el país.

Guadua angustifolia

Bambú leñoso perteneciente a la familia de las gramíneas. Este tipo de bambú sobresale dentro del género, no solo por sus capacidades físico-mecánicas sino por el tamaño de sus culmos que alcanzan hasta 30 metros de altura y tienen un diámetro de 0.25 m.

Considerada entre las 20 mejores especies de bambú debido a su capacidad de absorber energía y admitir una mayor deflexión convirtiéndolo en un material sismorresistente para la construcción. Crece naturalmente en países como Colombia, Venezuela y Ecuador, también ha sido introducida con éxito en países de Centroamérica, islas del Caribe, Hawái y Asia.



Fotografía 1: Especies de bambú *Bambusa guadua angustifolia*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_guadua_angustifolia/

Acceso el 11 de marzo 2020

Dendrocalamus asper

Bambú de tallos de 20 a 30 metros de altura y diámetro de 0.20 a 0.30 m, las paredes del tallo son de tipo tubular y tienen un grosor de 0.5 a 2 centímetros, rizoma de tipo paquimorfo. Especie nativa de la India, Birmania y Tailandia, en Guatemala fue introducida y sembrada en el municipio de Santa Bárbara, Suchitepéquez entre 200 y 600 msnm.

Los tallos pueden usarse en la construcción de viviendas, puentes rurales, cercas, conducción de agua, muebles, artesanías y otras industrias. Ideal para fabricar laminados, artículos comprimidos y revestimiento.



Fotografía 2: Especies de bambú *Dendrocalamus asper*.

Fuente: <http://greenbusiness.solutions/wp-content/uploads/2018/09/dendrocalamus-asper.jpg>

Acceso el 12 de marzo 2020

Gigantochloa verticillata

Especie cuyo tallo alcanza los 25 metros de altura y diámetro promedio de 0.10 m los tallos tienen un grosor de 1 a 2 centímetros. La especie fue introducida al país, en específico en la finca Chocolá, Santa Adelaida, San Felipe. Su altura ideal de cultivo es oscila de 600 a 1000 msnm. El principal uso de los tallos es para tejidos artesanales y como refuerzos en la construcción con cemento.



Fotografía 3: Especies de bambú *Bambusa gigantochloa verticillata*

fuentes: <https://www.greenplantswap.co.uk/plants/8667-gigantochloa-verticillata>

Acceso el 11 de marzo 2020

BREVE DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA

A continuación, se describe de forma breve y parafraseadas las partes que conforman la morfología de las especies de bambú, de acuerdo al *Manual para el cultivo de bambú* del ICTA.

Rizoma:

Eje segmentado, típicamente subterráneo, que constituye la estructura de soporte de la planta, de gran importancia para la absorción, consta de 3 partes: cuello del rizoma, rizoma y raíces adventicias. Hay 3 formas de rizomas: Paquimorfo, Leptomorfo y Anfimorfo.

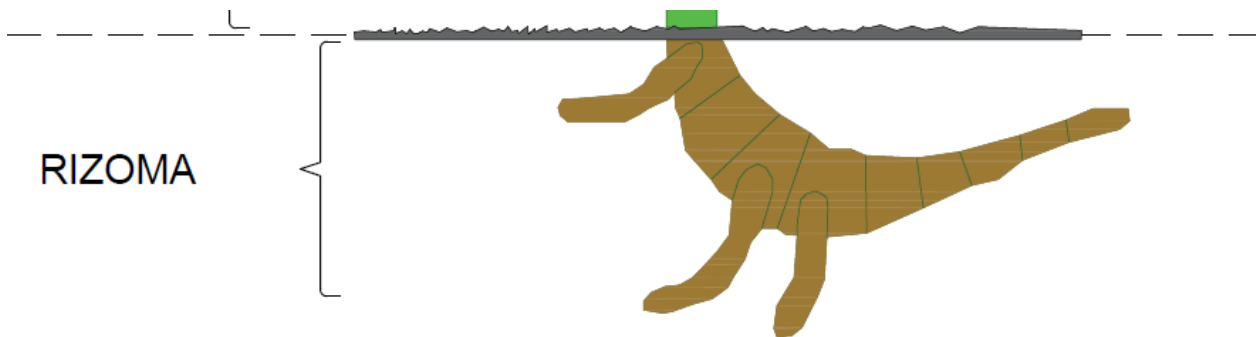


Imagen 30: Partes del bambú “Rizoma Paquimorfo”.
Elaboración propia.

Culmo

Eje aéreo segmentado que emerge del rizoma, consta de 3 partes: cuello, nudos y entrenudos. Los nudos son la parte más resistente del culmo, pueden ser prominentes o imperceptibles. Otra característica importante a observar es la presencia o no de exudado (cera), la presencia de agua en la cavidad interna, el color y textura de la superficie.

Con relación al hábito de los culmos, los bambúes se pueden agrupar en: estrictamente erectos, erectos pero arqueados en la punta, estrictamente ascendentes y trepadores, erectos en la base y ascendentes en la parte superior.

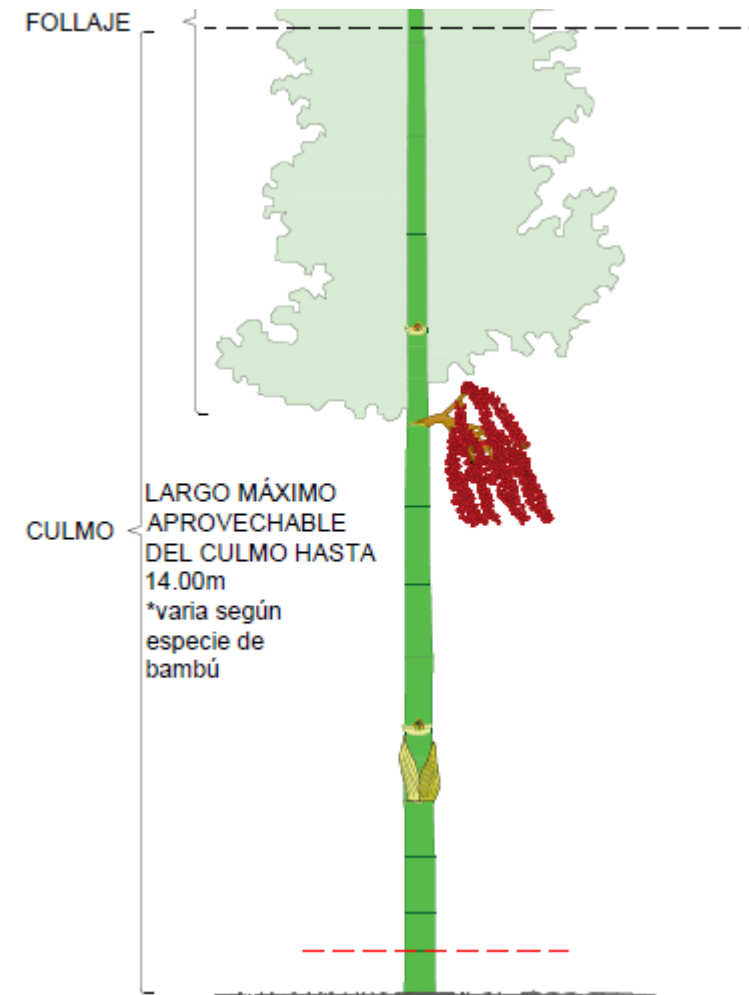


Imagen 31: Partes del bambú “Culmo de bambú”.
Elaboración propia.

Yema

Está siempre protegida por un profilo, puede ser activa e inactiva, de carácter vegetativa o reproductiva.

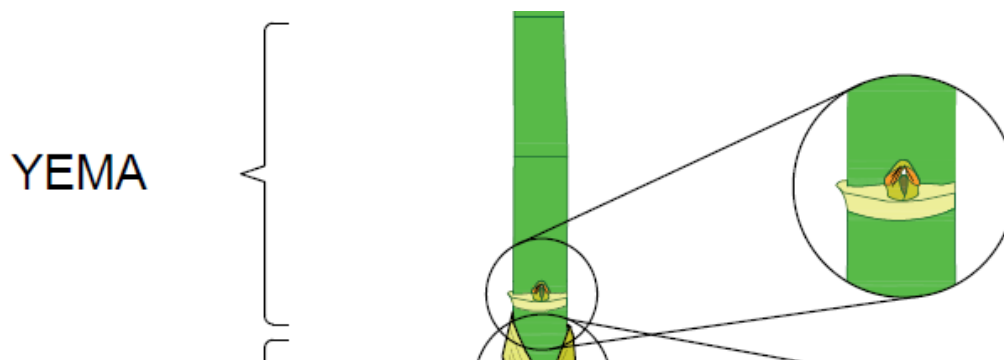


Imagen 32: Partes del bambú “Yema de bambú”.
Elaboración propia.

Ramas

Se originan en la línea nodal, por encima de esta o sobre un promontorio, su número y organización varían mucho, existen desde 1 hasta 100 por nudo, en forma de abanico.

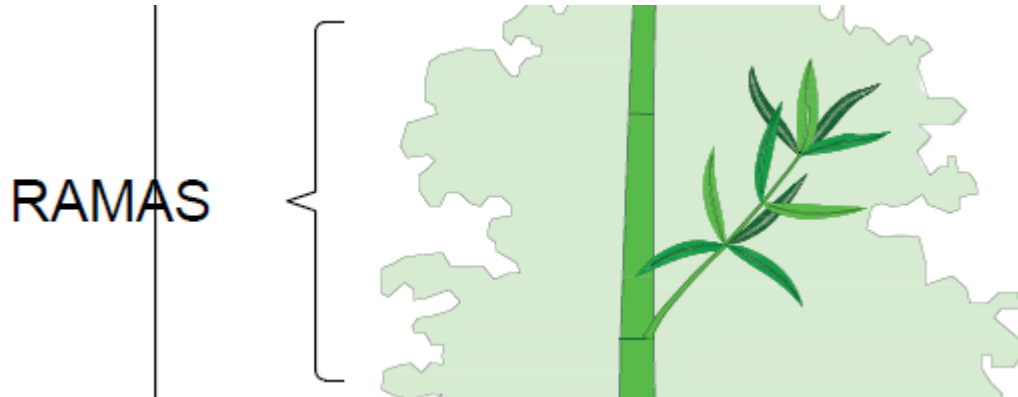


Imagen 33: Partes del bambú “Ramas de bambú”.

Elaboración propia.

Hoja caulinar

Estructura que nace en cada nudo del culmo y tiene como función proteger la yema que da origen a las ramas y el follaje.

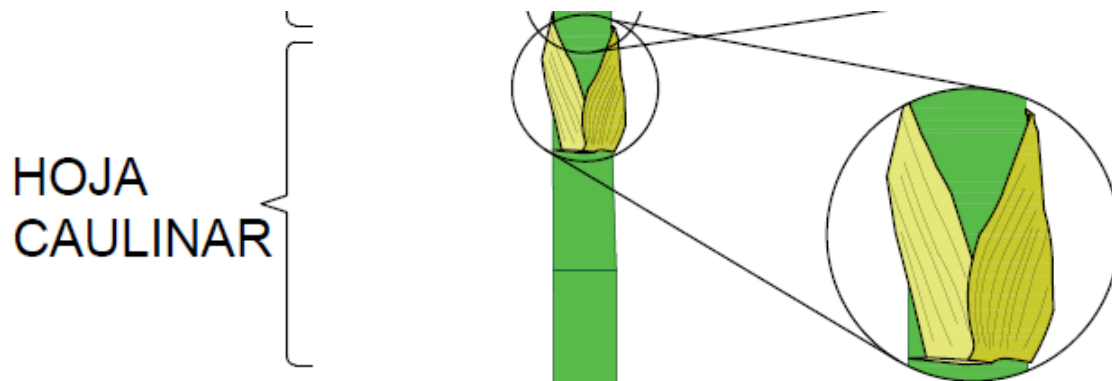


Imagen 34: Partes del bambú “Ramas de bambú”.

Elaboración propia.

Follaje

La principal fuente de elaboración de alimento en la planta.

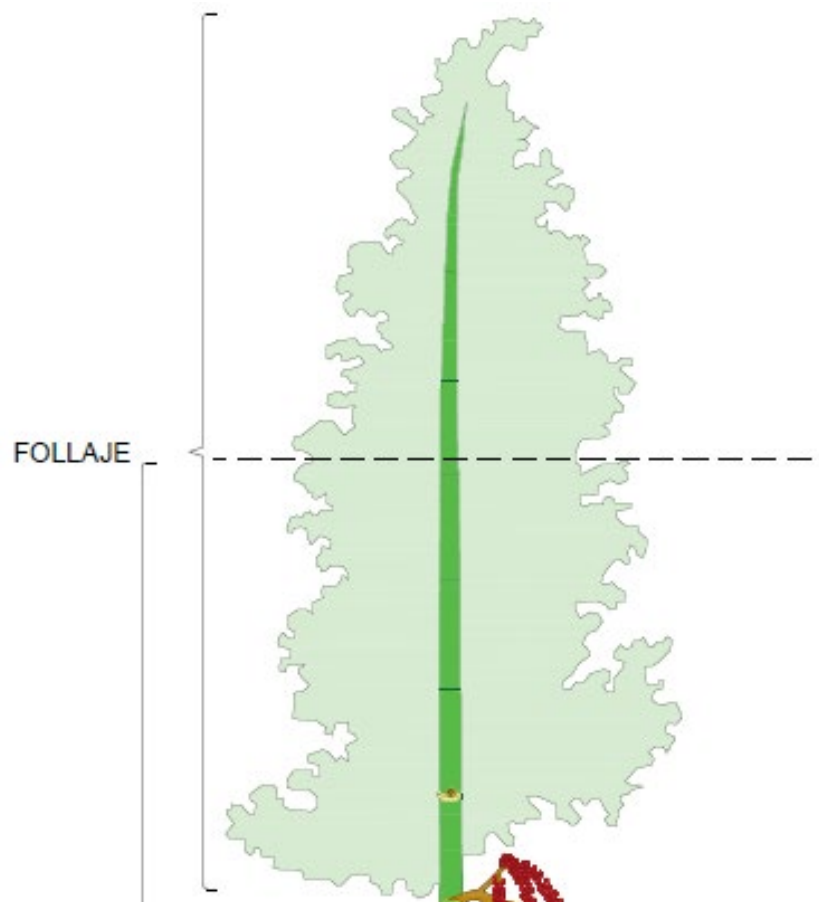


Imagen 35: Partes del bambú "Follaje de bambú".

Elaboración propia.

Inflorescencia:

Es un término muy general que hace referencia a una organización de flores en una planta y no tiene connotación morfológica.

Floración:

En los bambúes puede ser gregaria o esporádica, siendo gregaria cuando todos los miembros de una generación determinada con un origen en común. Se denomina esporádica cuando todos los miembros de una generación determinada con un origen en común entran gradualmente a la etapa reproductiva en diferentes o en intervalos irregulares.



Fotografía 4: Partes de bambú “Floración en bambú”.

fuelle: <http://learsivezman.blogspot.com/2012/04/la-flor-de-bambu.html>

Acceso el 17 de abril 2020

Fruto:

Sus principales características son la forma y tamaño del embrión y la forma del *hilum* son muy significativos y sirven para distinguir grupos mayores dentro de las gramíneas y ayudan a delimitar taxonómicamente a las subfamilias *Bambusoideae*.

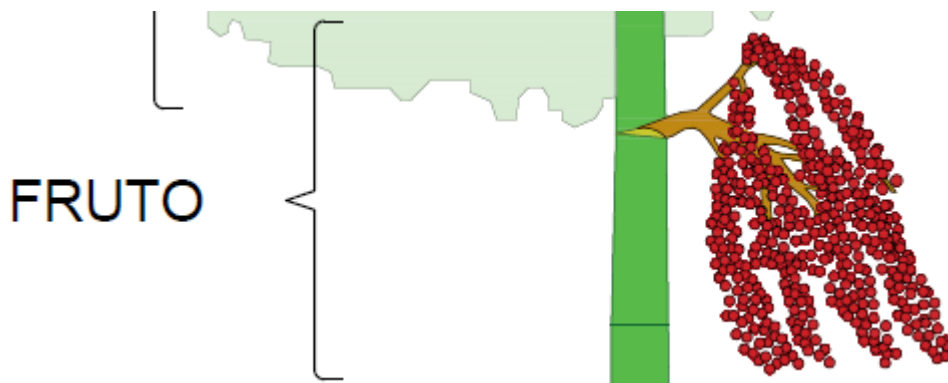


Imagen 36: Partes del bambú “Fruto de bambú”.

Elaboración propia.

EL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN

Siendo uno de los principales usos del bambú en nuestro país, existen diferentes técnicas para la construcción, entre las cuales, las más conocidas son la técnica china y la técnica colombiana, aunque existan otras técnicas suramericanas como la técnica ecuatoriana y la brasileña, la técnica peruana también destaca por su normativa referente al bambú entre ellas la *Norma E-100*.

Este uso puede ser de una forma natural, que es la utilizada desde la antigüedad en forma rolliza o sus derivados, tableros de esterilla, postes, costaneras, tijeras, canales, tablillas y cintas entre otros. (Valdez Cancinos 2013)

Principales especies de bambú usadas en la construcción:

- *Dendrocalamus asper*,
- *Guadua angustifolia*.

El bambú es un material de alta versatilidad, con propiedades físico-mecánicas que hacen que tenga alto potencial, bien sea para construir puentes peatonales, residencias de formas orgánicas, viviendas de interés social, hasta en andamiajes y obras falsas.

BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Recurso renovable.	Fácilmente se raja paralelo a las fibras.
Material liviano por sus características.	Altamente combustible al fuego
Estructura física de los culmos.	Poco desarrollo tecnificado de inmunización.
Excelentes capacidades de flexión lo hacen un material sismorresistente.	Amplia variedad de especies y características lo hacen poco estandarizable.
Planta de rápido crecimiento.	Necesita de mantenimiento para que sea durable.
Bajo costo de transformación.	Baja resistencia a la humedad y rayos del sol.
Uso de herramientas simples.	Es atacado por plagas y hongos.

Tabla 2: Comparativo de ventajas y desventajas del bambú como material de construcción.
Elaboración propia.

Distribución geográfica y ecología de bambú

Generalmente la adaptación del bambú al clima varía según la especie y condiciones meteorológicas existentes en la zona, tales como la altitud, precipitación, temperatura y algunas características del suelo. (Valdez Cancinos 2013)

Geografía

En nuestro país *“las especies se encuentran con mayor densidad en los departamentos de San Marcos, Suchitepéquez, Retalhuleu y Escuintla, aunque hay presencia en otros departamentos.” (Valdez Cancinos 2013)*

ESPECIES DE BAMBÚ PRESENTES EN GUATEMALA, ESTUDIADAS PARA SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

Si bien existe una gran variedad de especies de bambú que se emplean en la construcción por medio de la arquitectura vernácula en el país, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en las facultades de Agronomía e Ingeniería se han desarrollado tesis de grado teniendo como tema en común el bambú, bien sea tratando la caracterización y propiedades físicas y mecánicas de especies seleccionadas de bambú, así como el diseño y desarrollo de vigas tipo joist usando el bambú como material estructural, por lo anterior, a continuación se parafrasean y citan estos trabajos para dar validez al uso del bambú como material de construcción, logrando determinar qué especies presentes en el país han sido probadas en laboratorio.

A continuación, se describen brevemente las especies que se cultivan en país y que han sido estudiadas para su uso en la construcción. Las mismas corresponden a la tesis de Josué Jonattan Salazar Monterroso en su trabajo de grado:

Bambusa arundinacea

Bambú de rizoma paquimorfo, nativo de la India, de tallos en crecimiento compacto arqueado. Los culmo alrededor de 16 m de longitud, diámetro exterior en promedio de 0.049 m, los entrenudos aproximadamente a 0.32 m, grosor de pared promedio de 13 milímetros.



Fotografía 5: Especies de bambú *Bambusa arundinacea*

Fuente: <https://www.seedsforafrica.co.za/products/giant-bamboo-bambusa-arundinacea-10-seeds>

Acceso el 11 de marzo 2020.

Bambusa textilis

Se considera nativa del sureste de China, son arqueadas apicalmente. Los culmos alcanzan una altura aproximada de 17 m y un diámetro exterior de aproximadamente 0.06 m, los entrenudos aproximadamente a 0.55 m, grosor de paredes de hasta 7,0 milímetros.



Fotografía 6: Especies de bambú *Bambusa textilis*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_bambusa_textilis/

Acceso el 11 de marzo 2020.

Bambusa tulda

Bambú nativo de la India. macollas compactas, arqueadas apicalmente. Los culmos llegan a medir alrededor de 18 m y con diámetros promedio de 0.09 m, los entrenudos alrededor de 0.58 m, con paredes de hasta 13,0 milímetros.



Fotografía 7: Especies de bambú *Bambusa tulda*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_bambusa_tulda/

Acceso el 11 de marzo 2020.

Bambusa tuldoides

Considerada nativa del sureste de China, macolla de cañas semicompactadas, rectas. Alcanzan una altura de alrededor de 13 m y un diámetro alrededor de 0.05 m, los entrenudos alrededor de 0.44 m, poco inflados, las paredes de hasta 11,3 milímetros.



Fotografía 8: Especies de bambú *Bambusa tuldoides*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_bambusa_tuldoides/

Acceso el 11 de marzo 2020

Bambusa vulgaris

Originaria de India y Madagascar, macollas de cañas abiertas, arqueadas apicalmente. Alcanzan una altura alrededor de 10.5 m y un diámetro promedio de 0.063 m, los entrenudos de alrededor de 0.44 m, las paredes de las cañas en promedio de 6.5 milímetros.



Fotografía 9: Especies de bambú *Bambusa vulgaris*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_bambusa_vulgaris/

Acceso el 11 de marzo 2020

Bambusa gigantochloa verticillata

Nativo de Java, macollas de cañas compactas, arqueadas apicalmente, llegan a medir alrededor de 20 m con diámetro promedio de 0.12 m, los entrenudos hasta de 0.53 m y grosor en promedio de 13 milímetros.



Fotografía 10: Especies de bambú *Bambusa gigantochloa verticillata*.

Fuente: <https://www.greenplantswap.co.uk/plants/8667-gigantochloa-verticillata>

Acceso el 11 de marzo 2020

Bambusa guadua angustifolia

Bambú de rizoma paquimorfo, nativo de Colombia y Ecuador, de tallos espaciados, arqueados apicalmente. Generalmente llega a medir 25 m, con un diámetro de 0.15 m y entrenudos que varían de 0.20 a 0.40 m, el espesor de pared de hasta de 30 milímetros.



Fotografía 11: Especies de bambú *Bambusa guadua angustifolia*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_gadua_angustifolia/

Acceso el 11 de marzo 2020.

Bambusa melocanna baccifera

De rizoma paquimorfo, nativo de India y Burma de tallos delgados y abiertos, arqueados apicalmente, longitud alrededor de 12.5 m, con diámetro promedio de 4.4 centímetros. Los entrenudos alrededor de 0.57 m, y grosor de pared en promedio de 4 milímetros.



Fotografía 12: Especies de bambú *Bambusa melocanna baccifera*.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Pure-patch-of-bamboo-Melocanna-baccifera-in-North-East-India_fig4_273003098

Acceso el 12 de marzo 2020

Bambusa phyllostachys bambusoides

De rizoma leptomorfo, nativo de China, de tallos bastante abiertos, erectos, la longitud del tallo alrededor de 8.6 m, diámetro promedio de 0.027 m, longitud del entrenudo alrededor de 0.234 m y espesor de pared promedio de 5.0 milímetros.



Fotografía 13: Especies de bambú *Bambusa phyllostachys bambusoides*.

Fuente: <https://www.gardenia.net/plant/phyllostachys-bambusoides>

Acceso el 12 de marzo 2020.

Bambusa chusquea pittieri

Bambú de sombra son erectos o suberectos, los culmos llegan a medir alrededor de 18 m, formando macollas relativamente abiertas, con longitud de entrenudos alrededor entre 0.15 a 0.25 m, con un diámetro alrededor de 0.03 a 0.05 m y un espesor de hasta 7 milímetros.



Fotografía 14: Especies de bambú *Bambusa chusquea pittieri*

Fuente:

http://www.bambooweb.info/ShowBambooPictures2.php?BoolD=126&Desc=&Loc=&Match=&Cat=*&Genus=*&s=21 Acceso el 12 de marzo 2020

Bambusa giganteus apus

Bambú nativo de Indonesia, los culmos oscilan entre 10 y 20 m aproximadamente, con longitud entre nudos de 0.45 a 0.65 m, con un diámetro alrededor de 0.05 a 0.10 m y espesor de pared promedio de 9.6 milímetros.



Fotografía 15: Especies de bambú *Bambusa giganteus apus*.

Fuente: http://greenbusiness.solutions/bamboo_gigantochloa_apus/

Acceso el 12 de marzo 2020.

Características físicas de las especies estudiadas

Las principales propiedades físicas que se deben observar en el bambú son, **la densidad**, la cual determina en gran medida el peso de los culmos; **el contenido de humedad**, que está relacionado con las **contracciones volumétricas** que determinan el volumen de los culmos.

Tanto la densidad como el contenido de humedad influyen en la resistencia de los culmos de bambú, dicha resistencia también varía entre especies.

Contenido de humedad

“Los tallos vivos de bambú, como los árboles, contienen una cantidad considerable de humedad debido a la presencia de savia. El contenido de humedad en los bambúes jóvenes es casi igual en diversas partes del tallo, y en cambio, en los tallos maduros, el contenido de humedad decrece con la altura de este. El contenido de humedad del bambú, como el de la madera, se expresa como un porcentaje de su peso seco al horno.” (Monterroso Salazar 2014)

Contracción

“Conforme se van secando los tallos de bambú, estos empiezan a perder agua en sus paredes trayendo consigo contracciones volumétricas. Cuando la humedad del bambú se equilibra con la del ambiente, la retracción cesa, ya que el efecto de esta es proporcional al contenido de humedad del tallo y del estado higrométrico del ambiente. Los cambios volumétricos son mayores en los bambúes jóvenes que en los de mayor edad. La contracción se produce desigualmente según el sentido que se considera y su efecto es mayor en los entrenudos del tallo.” (Monterroso Salazar 2014)

Densidad

“Esta característica física resulta muy importante, pues indica el peso del bambú por unidad de volumen. La densidad difiere para cada especie y su valor también varía entre los culmos de una especie, en los diversos tramos de un culmo, así como en las partes internas y externas del mismo.” (Monterroso Salazar 2014)

Las siguientes tablas resumen las características físicas de las especies de bambú estudiadas en las tesis de agronomía e ingeniería citadas previamente:

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ESPECIES BAMBÚ

No.	Especie	Densidad (ρ) (g/cm ³)	Contenido humedad (C.H.) (%)
1	<i>Bambusa textilis</i>	0.77	15.60
2	<i>Bambusa tulda</i>	0.87	14.80
3	<i>Bambusa tuldoidea</i>	0.78	14.20
4	<i>Bambusa vulgaris</i>	0.69	16.60

Tabla 3: Características físicas de 4 especies de bambú, Grupo A
Elaboración propia. basada en (Urrutia Revilla 1983).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ESPECIES BAMBÚ

No.	Especie	Densidad (ρ) (g/cm ³)	Contenido humedad (C.H.) (%)
5	<i>Bambusa arundinacea</i>	0.56	14.90
6	<i>Bambusa melocana baccifera</i>	0.73	14.40
7	<i>Bambusa phyllostachys bambusoides</i>	0.60	14.60
8	<i>Bambusa chusquea pittieri</i>	0.95	15.50

Tabla 4: Características físicas de 4 especies de bambú Grupo B
Fuente: Elaboración propia basada en (Morales Jolá 1985)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ESPECIES BAMBÚ

No.	Especie	Densidad (ρ) (g/cm ³)	Contenido humedad (C.H.) (%)
9	<i>Giganteus apus</i>	0.96	17.30
10	<i>Bambusa giganteochloa verticillata</i>	0.63	16.02
11	<i>Bambusa guadua angustifolia</i>	0.62	14.20

Tabla 5: Características físicas de 3 especies de bambú Grupo C.
Elaboración propia, (Cano Díaz 2012)

Propiedades mecánicas de las especies estudiadas

Las estructuras en general sin importar el material con el cual se construyan se someten a esfuerzos mecánicos, que los materiales deben soportar, las estructuras en bambú no son ajenas a ellos, estos esfuerzos tienen mayor presencia en los nudos de las estructuras, por lo que a continuación se analizan los principales esfuerzos a los cuales se someten. (Redacción propia con base en (Torres Rojas 2020):

Compresión:

Consistente en 2 fuerzas convergentes en sentido opuesto y un mismo eje, dependiendo de cómo se aplican las fuerzas sobre el culmo, este puede sufrir:

- a) Compresión paralela a las fibras del culmo, presente en columnas o apoyos de la estructura



Imagen 37: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Compresión paralela a la fibra”.
Elaboración propia.

- b) Compresión perpendicular a las fibras del culmo, sucede cuando un culmo vertical es apoyado perpendicularmente sobre un culmo horizontal, actuando como una carga puntual, este efecto a su vez tiende a generar efectos de cortante y aplastamiento por lo que se rellena con mortero de cemento y arena la cámara entrenudos sobre la cual se apoyó el culmo.

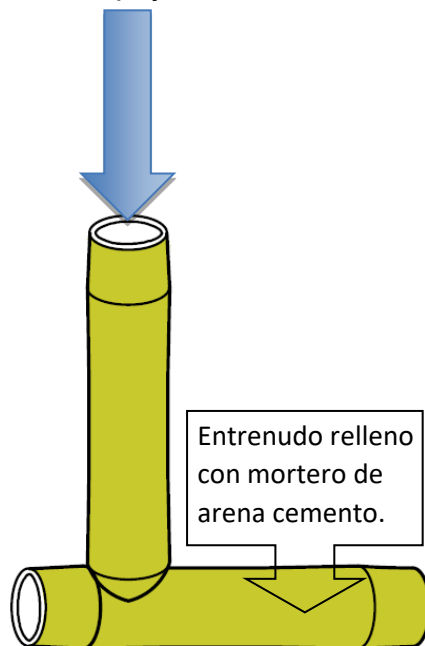


Imagen 38: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Compresión perpendicular a la fibra”.
Elaboración propia.

Cortante:

Consistente en 2 fuerzas convergentes en sentido opuesto y en diferentes ejes sobre un elemento, que provocan el corte perpendicular del mismo.

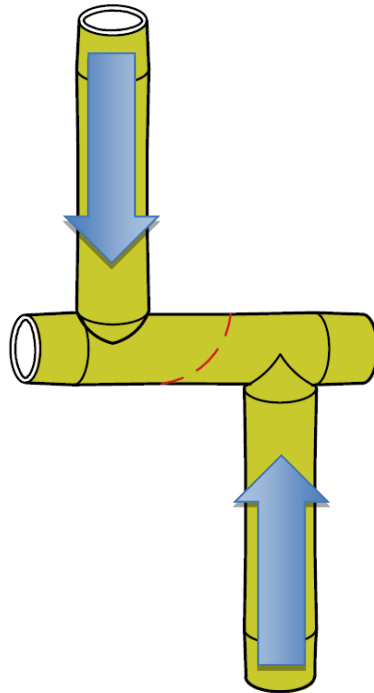


Imagen 39: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Cortante por compresión perpendicular a la fibra”.
Elaboración propia.

Aplastamiento:

Consistente en 2 fuerzas convergentes en sentido opuesto y un mismo eje que actúan sobre un elemento, haciéndolo colapsar. Para evitar el aplastamiento se deben ubicar las cargas a una distancia no mayor a 0.20 m de los nudos.

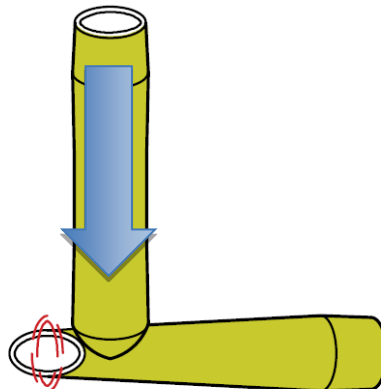


Imagen 40: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Aplastamiento por compresión perpendicular a la fibra”.
Elaboración propia.

Tracción:

Consistente en 2 fuerzas divergentes en sentido opuesto y un mismo eje, que actúan en sentido paralelo a las fibras del culmo, estirando este.



Imagen 41: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Tracción paralela a la fibra”.

Elaboración propia.

Flexión:

Consistente en fuerzas que actúan sobre un culmo horizontal (viga apoyada en sus extremos), las fuerzas actúan como una carga uniformemente distribuida, generando que el culmo se flexione hacia abajo.

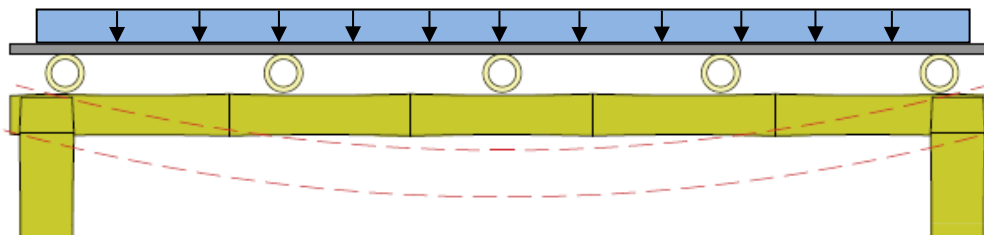


Imagen 42: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Flexión perpendicular a la fibra”.

Elaboración propia.

Torción:

Consistente en fuerzas que giran en sentido opuesto sobre un mismo eje, modificando físicamente el culmo, suelen ser provocado por efectos externos a la estructura como carga de viento o sismos.

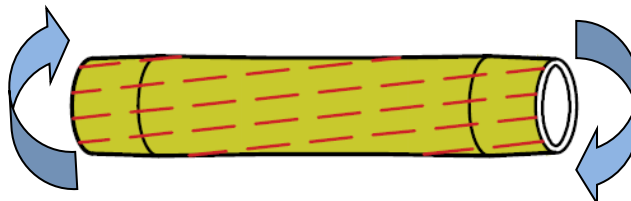


Imagen 43: Esfuerzos mecánicos en el bambú “Torción en las fibras”.

Elaboración propia.

Fallas en el bambú por esfuerzos mecánicos

Como se indicó anteriormente, al someter el bambú a esfuerzos mecánicos, como todos los materiales, este tiende a sufrir fallas, las cuales son importantes conocer para determinar los límites físico-mecánicos naturales de este, logrando realizar su aplicación de manera segura en la construcción. A continuación, se presentan las principales fallas del bambú:

Tensión Paralela a la fibra

“Es la mejor propiedad que posee el bambú. No obstante, es poco común en la práctica ejercer tensión longitudinal a una especie de bambú e incluso madera. Debido a que la resistencia a la tensión supera la resistencia a la compresión y mucho más al esfuerzo cortante, resulta por consiguiente, difícil efectuar ensayos satisfactorios con tensión paralela a la fibra.” (Monterroso Salazar 2014)

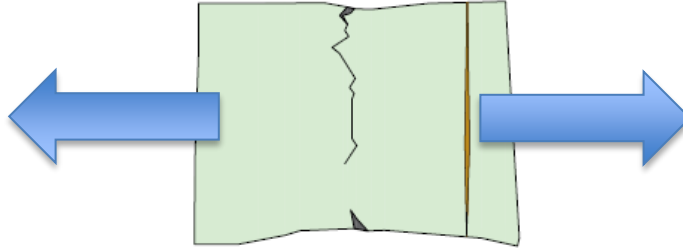


Imagen 44: Fallas en el bambú “Tensión paralela a la fibra”.
Elaboración propia.

Compresión paralela a la fibra

“Mucho del bambú empleado en la construcción está sometido a compresión paralela a la fibra, por ejemplo; en columnas, vigas y otros. Los cuales están sujetos a cargas que tienden a aplastar y acortar los miembros longitudinalmente. La resistencia a compresión del bambú es relativamente alta, pero carece de significado si no se especifica el grado de sazónamiento y la relación entre la longitud y el diámetro de la pieza. Es importante definir el grado de sazónamiento puesto que, como en la madera, la humedad disminuye la rigidez de las células fibrosas, trayendo consigo una disminución en las propiedades mecánicas, sobre todo en compresión y flexión. Asimismo, se tiene que considerar la relación entre la longitud y el diámetro. Si la longitud de un tallo es suficientemente grande con respecto a la mínima sección transversal, la resistencia bajo carga compresiva disminuye considerablemente por el efecto de flambéo.” (Monterroso Salazar 2014) Esta falla ocurre en los extremos de los culmos, cuando son cortados separados de los nudos.

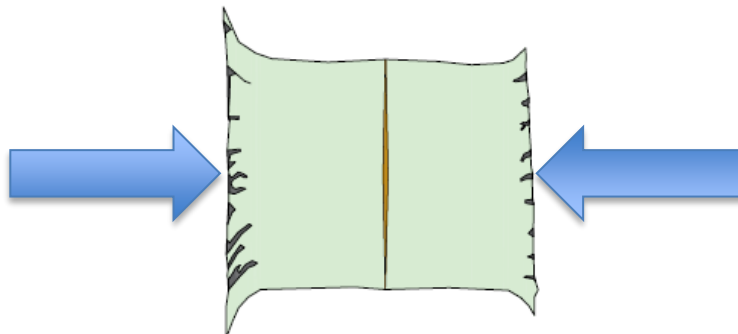


Imagen 45: Fallas en el bambú “Compresión paralela a la fibra”.
Elaboración propia.

Corte paralelo a la fibra

“El esfuerzo cortante es una medida de la capacidad del bambú a resistir fuerzas que tienden a producir deslizamiento de una porción del material con relación a otra porción adyacente. El empleo del bambú en la construcción involucra la presencia de esfuerzos cortantes en mayor o menor grado y las fuerzas que los producen pueden actuar a lo largo de la fibra, o a través de la fibra y en forma inclinada o en diagonal a la misma. Muchos de los detalles de uniones de elementos de bambú están sujetos a corte paralelo a la fibra.” (Monterroso Salazar 2014) Esta falla ocurre en cualquier parte de la superficie del culmo.

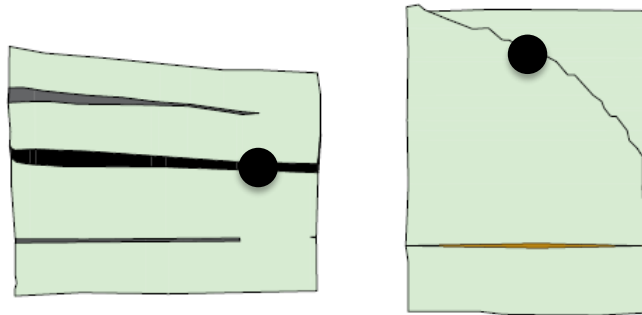


Imagen 46: Fallas en el bambú “Corte paralelo a la fibra”.
Elaboración propia.

Tensión perpendicular a la fibra

“Es la disgregación de las fibras por fuerzas que actúan perpendicularmente a las mismas. Se relaciona estrechamente al clivaje por la actuación de separar el bambú a lo largo de la fibra. Por lo general, las grietas o rajaduras en la superficie se presentan cuando los esfuerzos que se crean durante el secado exceden a la resistencia del bambú en tensión perpendicular a la fibra. Por esta razón, la tendencia que el bambú tiene de rajarse limita el uso de clavos o pernos para asegurar las uniones.” (Monterroso Salazar 2014) Esta falla ocurre en los entrenudos del culmo.

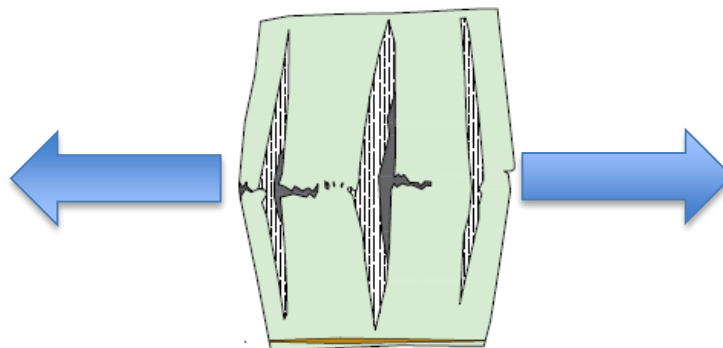


Imagen 47: Fallas en el bambú “Tensión perpendicular a la fibra”.
Elaboración propia.

Clivaje

“Esta se utiliza para denotar la resistencia que ofrece el bambú al desgarramiento. Se expresa como la fuerza necesaria para provocar la falla por unidad de longitud. En esta prueba las fuerzas actúan en forma de cuña para hender el bambú a lo largo de la fibra. Una baja resistencia al clivaje favorece cortar longitudinalmente las cañas de bambú, mientras que una alta resistencia es requerida para uniones con pernos, clavos, clivajes y otros tipos.” (Monterroso Salazar 2014) Debido a la tendencia del bambú a rajarse a lo largo de las fibras restringe el uso de clavos o clivajes para asegurar las uniones, por lo que se prefiere barrenar el culmo para usar pernos pasador y tornillos en las uniones.

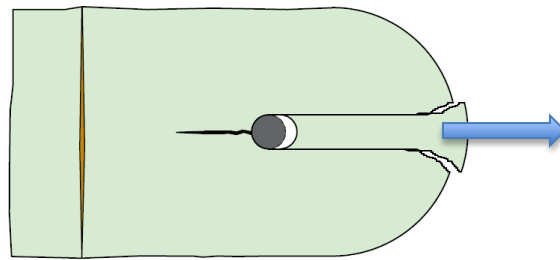


Imagen 48: Fallas en el bambú “Clivaje”.
Elaboración propia.

Pandeo local de las fibras

“Ocurre en las inmediaciones del nudo, debido a la desviación de los esfuerzos de compresión que siguen la dirección de las fibras” (Salazar Jaramillo, Quintero Suarez and Fonthal 2016)

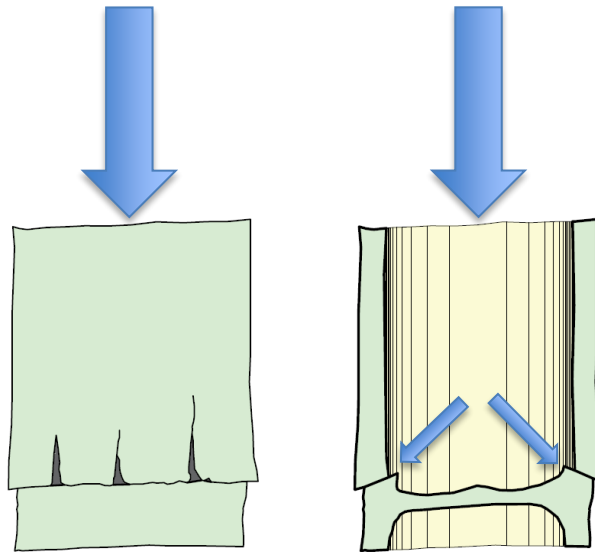


Imagen 49: Fallas en el bambú “Pandeo local de las fibras”.
Elaboración propia.

La tabla 6, muestra las propiedades mecánicas de las diferentes especies de bambú estudiadas anteriormente, estos datos fueron recopilados bibliográficamente. (Monterroso Salazar 2014)

No.	Especie		Tensión paralela	Tensión \perp	Compresión paralela	Corte paralela	Clivaje
			$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)	σ_{\perp} (kg/cm ²)	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kg/cm ²)
1	<i>Textilis</i>	con nudo	1 230,00	27	645,00	124,00	50
		sin nudo	2 844,00		701,00		
2	<i>Tulda</i>	con nudo	1 554,00	40	788,00	126,00	48
		sin nudo	2 280,00		758,00		
3	<i>Tuldoides</i>	con nudo	1 506,00	22	601,00	117,00	46
		sin nudo	2 108,00		554,00		
4	<i>Vulgaris</i>	con nudo	1 323,00	29	394,00	66,00	46
		sin nudo	1 872,00		402,00		
5	<i>Arundinacea</i>	con nudo	xx	xx	829,00	xx	xx
		sin nudo	xx		479,00		
6	<i>Melocana baccifera</i>	con nudo	1 079,00	xx	577,00	xx	xx
		sin nudo	2 469,00		831,00		
7	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	con nudo	1 398,00	xx	780,00	xx	xx
		sin nudo	2 001,00		798,00		
8	<i>Chusquea pittieri</i>	con nudo	1 254,00	xx	1 173,00	xx	xx
		sin nudo	1 436,00		1 007,00		
9	<i>Gigantochloa verticillata</i>	con nudo	xx	19.84	xx	118,35	25
		sin nudo	2 551,26		410,27		
10	<i>Guadua angustifolia</i>	con nudo	xx	21.86	xx	109,22	10
		sin nudo	2 522,20		422,76		
11	<i>Giganteus apus</i>	con nudo	xx	18.29	xx	126,84	xx
		sin nudo	1 530,12		410,73		

Tabla 6: Propiedades mecánicas de las especies de bambú.

Fuente: Monterroso Salazar (2014)

PREPARACIÓN DE BAMBÚ PARA UTILIZARLO EN CONSTRUCCIÓN

El bambú ha presentado notoriedad en los últimos años debido al cambio climático y a la búsqueda de una construcción más sostenible y ecológica, por lo que varios profesionales de otros países han investigado y desarrollado pruebas para comprender y determinar su aplicación en la arquitectura como material de construcción.

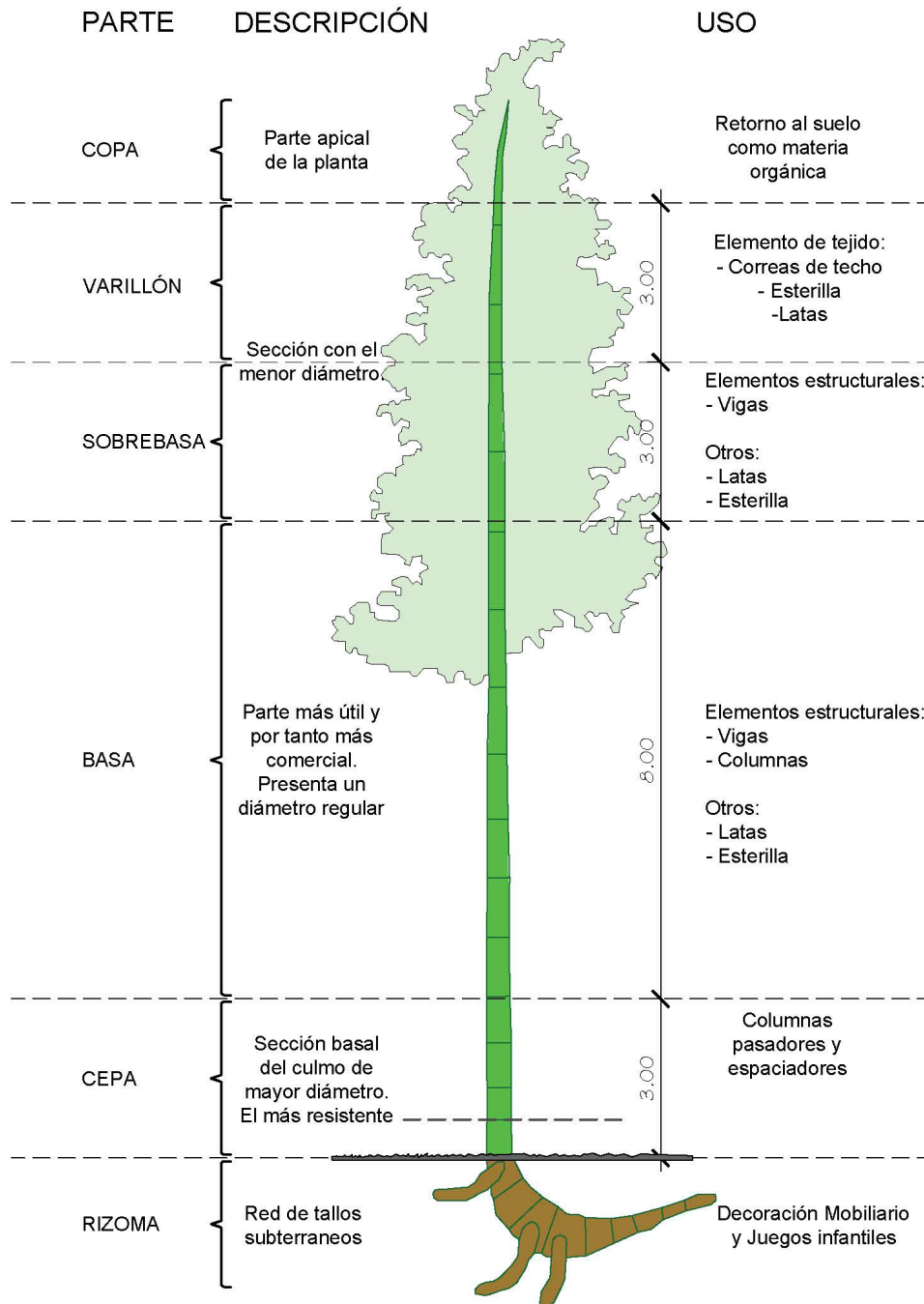


Imagen 50: Partes utilizables del bambú.

Elaboración propia.

TRANSFORMACIONES DEL BAMBÚ EN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Como se observa en la imagen anterior el bambú puede aplicarse de diferentes maneras en la construcción, siendo la más común utilizar los culmos en su estado natural sin mayor transformación previamente a los debidos tratamientos de preservación y curado. Además de este uso el bambú puede ser aplicado como material de construcción en otras formas, siendo necesario para ello realizar procedimientos de transformación física al culmo, dentro de estos procedimientos se mencionan los siguientes:

Modificación física del bambú por formaleta

Es posible modificar la forma natural del bambú, por lo que, a continuación, se describe el proceso presentado en el video del *Informativo CVC* (Vargas Sabogal 2017). Para modificar la sección natural del bambú se emplean formaletas de madera o acero, las cuales se instalan durante los primeros 4 meses de crecimiento, o bien, cuando el culmo alcanza 1.60 m de altura. El proceso tiene una duración de 18 meses por lo que requiere tiempo y paciencia para evitar dañar o incluso matar el culmo, durante el mismo cada 2 semanas se deberá confinar gradualmente el culmo dentro de la formaleta; posteriormente se realiza el control de nivel y se atiranta el culmo para que crezca recto y se obtenga la sección deseada. Pasados 6 meses de instalado el molde o formaleta, esta se retira, para esperar la maduración del culmo y proceder a cortarlo.



Fotografía 16: Modificación física del bambú por formaleta “Culmo cuadrado”.

Fuente: <https://bambucachipay.jimdofree.com/2012/07/16/square-bamboo/>

Acceso el 13 de mayo 2020

Transformación física del bambú en latas

Otro proceso de transformación del bambú consiste en cortar los culmos de bambú en “latas” (fajas) por medio del empleo de diferentes herramientas como: machetes, o

bien, cortador circular de hierro que tiene cuchillas concéntricas al eje que varían en la cantidad de cuchillas permitiendo cortar un culmo en varias latas a la vez, el número de cuchillas depende del diámetro del culmo a cortar y de la máquina cortadora de latas popularmente llamada “lateadora”. El corte se realiza en el sentido longitudinal del culmo, siguiendo las fibras de este.

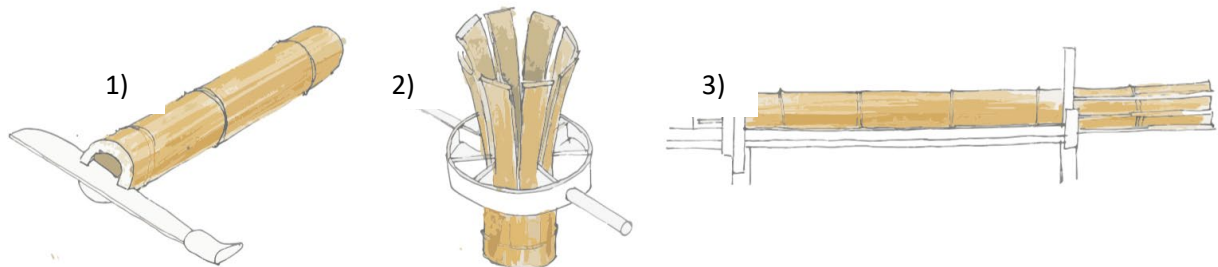


Imagen 51: Formas de cortar latas de bambú: 1) Machete, 2) Cortador circular de hierro y 3) Máquina “lateadora”

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Posteriormente a cortar el culmo de bambú en latas, se procede a remover los tabiques internos, para que las latas queden con un espesor más uniforme.



Imagen 52: Remoción de tabiques intermedios de las latas.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Terminada la limpieza de las latas de bambú, se procede a almacenarla en un lugar ventilado y protegido de la radiación solar.

Si la lata se utilizará como acabado, razón por lo que se busca tener un espesor uniforme y mejor presentación, se puede usar una canteadora o rebanadora para madera logrando mejores uniones con adhesivo entre las latas.

El proceso de transformación del bambú en latas permite la fabricación tecnificada de tableros de bambú aglomerados.

Transformación física del bambú en esterilla

El proceso de transformación del culmo bambú es similar a la fabricación de latas, con la diferencia de que se realizan cortes superficiales en el culmo y solo un corte profundo con la finalidad de abrir este para formar una plancha del perímetro de su diámetro por el largo del culmo.

“Para hacer esterilla se emplean secciones recién cortadas de 1 a 8 metros de longitud de la parte basal e intermedia del culmo de 2 y 3 años de edad. Es muy importante que el bambú este recién cortado para que garantice suficiente humedad y sea más flexible a los cortes y aplastamientos.” (Lucila Aguilar Arquitectos 2017)

Con un hacha de mano se realizan cortes sucesivos a lo largo del culmo, cortando más o menos la mitad del espesor de la pared de este. Dejando un espaciamiento entre cortes de 2 a 3 cm.

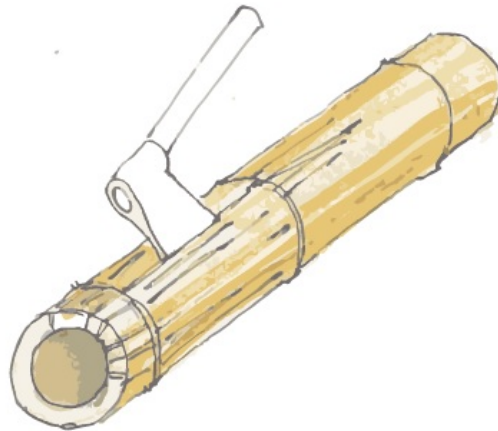


Imagen 53: Cortes del culmo para hacer esterilla
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Para abrir longitudinalmente el culmo se utiliza una lapa, rompiendo los diafragmas interiores en los nudos del culmo.

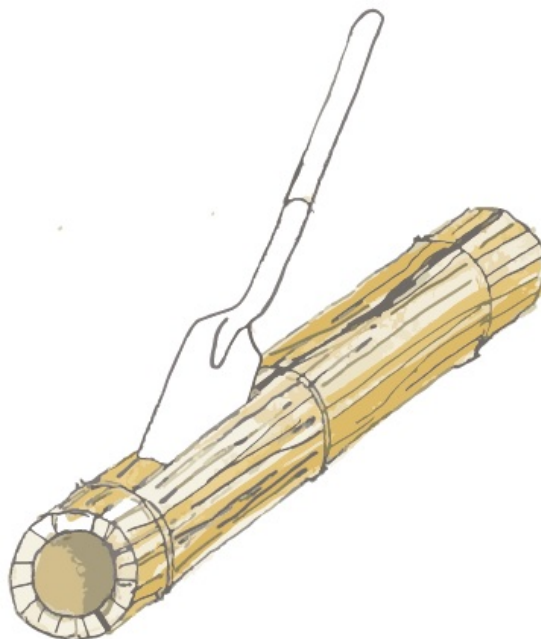


Imagen 54: Abrir el culmo para hacer esterilla.
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Seguidamente se despliega el culmo con las manos hasta lograr aplanar la esterilla.

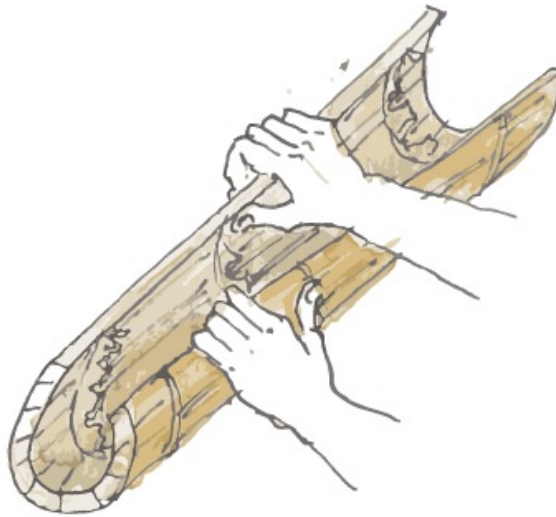


Imagen 55: Despliegue del culmo para hacer esterilla.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Para remover los segmentos de los diafragmas interiores en los nudos, así como remover la capa blanda se emplea una pala de punta cuadrada.

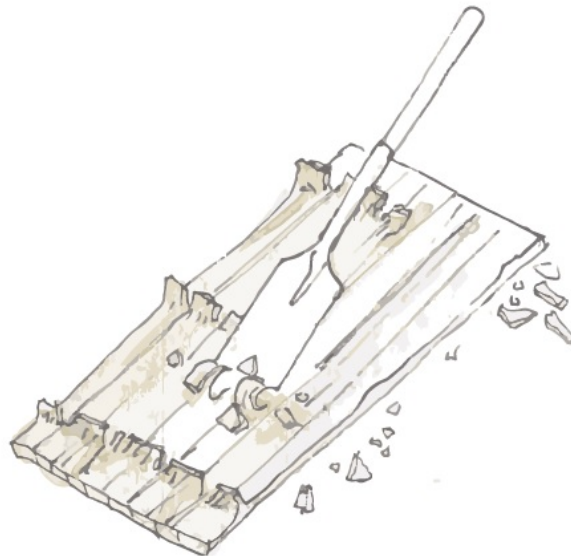


Imagen 56: Remoción segmento de diafragmas en los nudos del culmo.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Posteriormente a limpiar y lavar la esterilla, se debe sumergir dentro de una solución de pentaborato al 5% durante 4 días.

Secar y blanquear al sol, ubicando la esterilla en posición inclinada, rotando la misma periódicamente para que ambas caras experimenten el proceso.

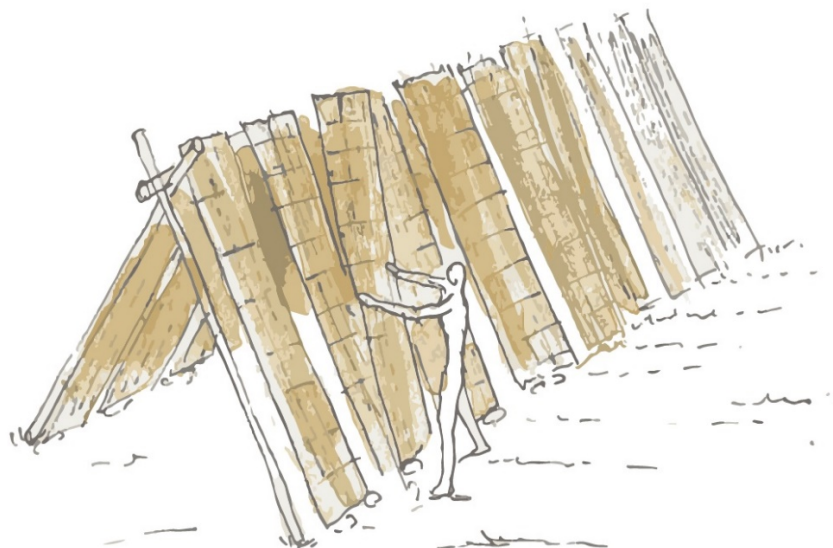


Imagen 57: Proceso de secado de la esterilla.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Finalmente, se deben almacenar las esterillas apilándolas de manera alternada, dejando espacio entre ellas para que obtengan ventilación.

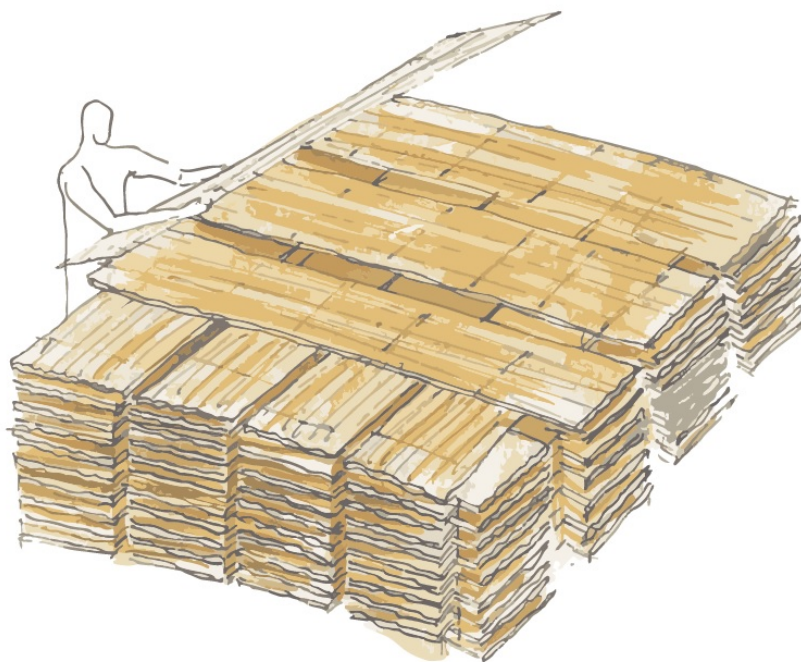


Imagen 58 Almacenamiento de la esterilla.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Transformación física del bambú en pinboo

Consiste en generar tableros con latas de bambú de 4 cm de ancho unidos entre sí normalmente con pines de madera, pines de bambú o en casos especiales con varillas roscada con tuercas. Utilizado para la conformación de piso, entresijos o muros.



Imagen 59 Fabricación de pinboo
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

Por medio de la combinación de sistema estructural adecuado más las capacidades físico-mecánicas del bambú según la especie a emplear, aunado a la creatividad propia del arquitecto es posible generar proyectos diferentes e innovadores.

La arquitecta mexicana Lucila Aguilar ha sido una de las profesionales que ha investigado el bambú, integrándolo a los proyectos arquitectónicos desarrollados por su oficina de arquitectura, llegando a desarrollar manuales de construcción, de los cuales se extraen las siguientes recomendaciones:

SELECCIÓN

Es el primer paso para la utilización del bambú, *para ser seleccionado para su corte y posterior extracción del bosque o plantación, debe cumplir ciertos requisitos o condiciones tales como:* (Ubidia 2000)

- *La edad*, para su explicación se ejemplificará con la especie *Guadua Augustifolia*, el color y la presencia de líquenes y musgos, son señales inequívocas, de que bambú está listo para el corte. (Ubidia 2000)
- *El color del culmo o tallo*, si el verde claro, brillante y lustroso del culmo de la *guadua*, se ha transformado en un gris verdoso, y si las tradicionales bandas blancas de cada nudo, casi han desaparecido, siendo reemplazadas por bandas grises apenas perceptibles, son señales que evidencian la madurez del bambú. El color del follaje se hace menos verde y brillante, que el de las *guaduas* vecinas y tiernas. (Ubidia 2000)

- La presencia de líquenes y musgos, cuando se observan líquenes blanquecinos en forma de pequeños círculos o motas, que cubren parcialmente el culmo de la guadua madura.
Si la guadua se desarrolla en climas cálidos y excesivamente húmedos, a los líquenes se añade la presencia de musgo. (Ubidia 2000)

La presencia de líquenes y musgos permiten definir que los culmos tienen entre 3 y 5 años.

- Otros requisitos como la ausencia de hojas caulinares, que no estén torcidas, quebradas, partidas o la inexistencia de rajaduras, la no presencia de señales de perforadores o de otros insectos. (Ubidia 2000)

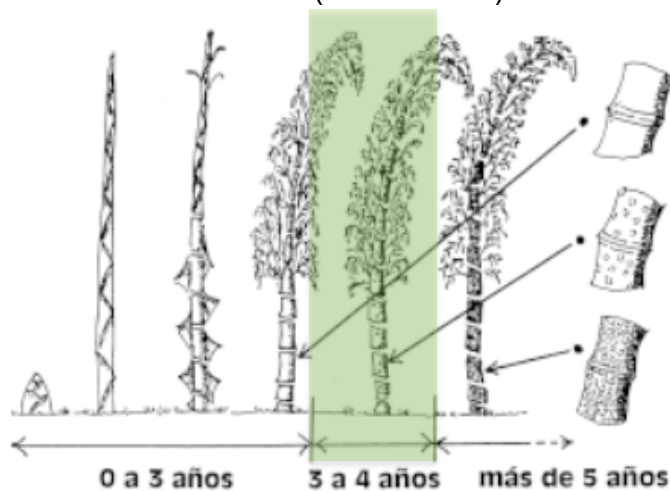


Imagen 60: Selección de culmos en edad de corte.
Fuente: Morán Ubidia (2000)

CORTE

La selección de la materia prima de bambú es muy importante para hacer construcciones de alta calidad. Criterios como la madurez, el momento y el método de corte son algunas consideraciones importantes para su aprovechamiento como recurso natural. (Lucila Aguilar Arquitectos 2017)

Madurez

Para determinar la madurez adecuada de los culmos del bambú para cortarlo se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- La edad de corte idónea es entre los 4 a 6 años de crecimiento.
- Las características físicas de la mata deben ser:
 1. Color más apagado con menos brillo.
 2. No presenta hoja caulinar.
 3. Se genera musgo y líquenes en su superficie.

Los autores consultados recomiendan diferentes rangos de edad, en el caso de Jorge A. Morán Ubidia recomiendan el corte entre los 3 a 4 años cumpliendo las otras condiciones de color, presencia de líquenes y musgo, etc., este rango de corte es recomendado para la especie *Guadua Augustifolia*, sembrada en la región de Ecuador y Colombia, mientras que, Lucila Aguilar recomienda cortar entre los 4 y 6 años cumpliendo con características físicas como color apagado, presencia de hoja caulinar, musgo y líquenes. Por lo anterior en nuestro país la edad de corte dependerá del tiempo de maduración de cada especie, así como de la ubicación en la cual este plantado el bambú, debido a que la maduración puede variar entre especies, la relación con el entorno y ecosistema (clima, humedad, altura, etc.).

Método

El método recomendado en el manual de Lucila Aguilar Arquitectos para el corte de los culmos de bambú es:

- Durante época de verano.
- Puede realizarse con machete, aunque es preferible usar sierra.
- El corte se realiza a la altura del primer o segundo nudo sobre el suelo.
- El corte debe hacerse al ras del nudo para evitar que se pudra el rizoma de bambú por acumulación de agua de lluvia.

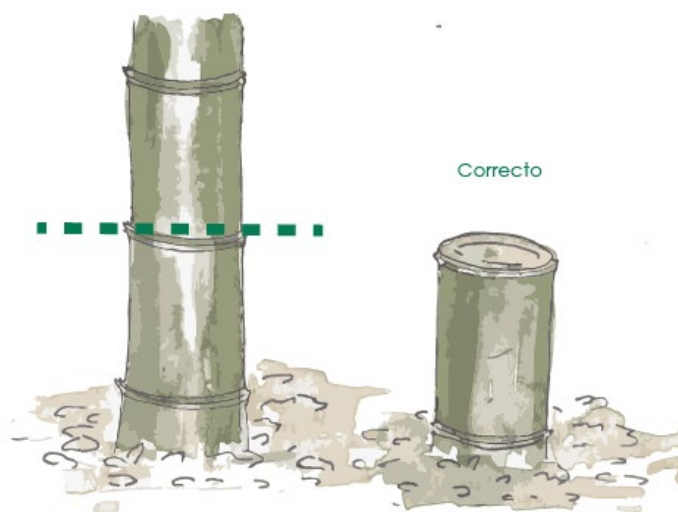


Imagen 61: Corte correcto de culmos de bambú.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

CURADO EN LA PLANTACIÓN O BOSQUE

El término "curado" se emplea en algunos países de América como sinónimo de "preservado", del bambú en la propia plantación, responde al siguiente proceso:

- Se deja en el propio lugar de corte, sobre el "tocón" de su base (C1), sobre una piedra (C2) o sobre un ladrillo (C3), lo más vertical posible, apoyando o recostado sobre los bambúes vecinos, con sus ramas y hojas respectivas, ...durante un lapso de 2 a 3 semanas.
- Al cabo del plazo mencionado, el bambú es colocado horizontalmente y despojado de ramas y hojas.
- El bambú, así "curado", tiene una coloración característica, que en el caso de la *guadua angustifolia* es amarilla-anaranjada y con un fuerte olor a alcohol.
- Las guaduas secadas de otra manera pasan del verde gris al amarillo-blanquecino. (Ubidia 2000)

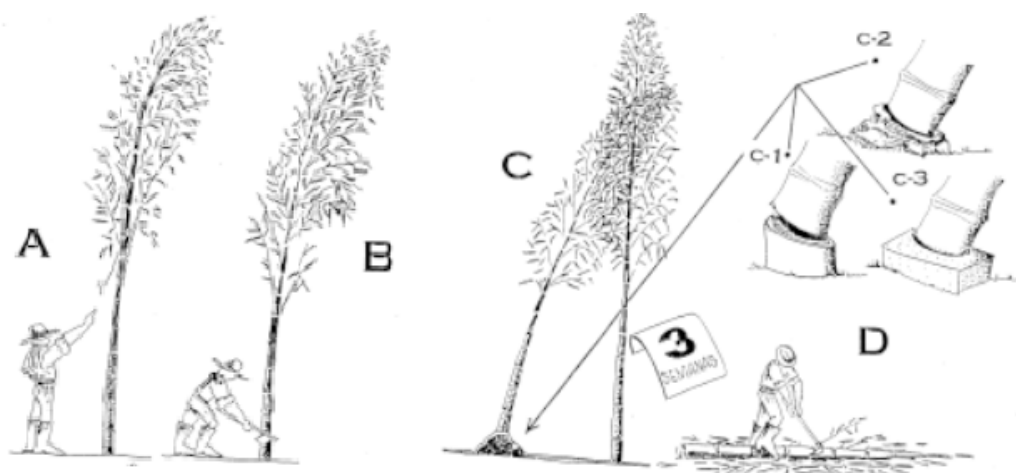


Imagen 62: Curado en la plantación A) Selección, B) Corte, C) Secado en plantación D) Quitar ramas y hojas del culmo de bambú.

Fuente: Morán Ubidia (2000)

Adicionalmente, el Morán Ubidia sugiere que posterior al corte, las siguientes partes sean tratadas con un repelente natural a base de la planta "*Ruta graveolens L*": La sección transversal del corte (1), Las paredes laterales, interiores y visibles del entrenudo (2) y el tabique inmediato (3).

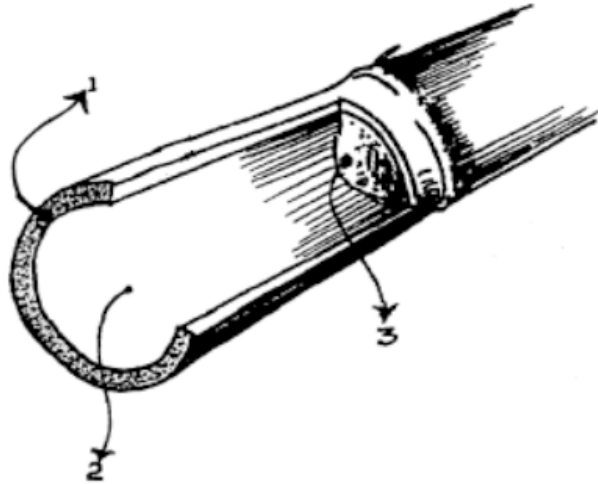


Imagen 63: Partes a proteger con repelente natural 1) Sección transversal del corte, 2) Las paredes laterales, interiores y visibles del entrenudo, 3) Tabique inmediato

Fuente: Morán Ubidia (2000)

PRESERVACIÓN

Debido a su gran contenido de humedad, almidón y azúcar en los culmos, el bambú requiere de tratamiento de preservación, para evitar que sea atacado por insectos y hongos.

- Existen métodos convencionales o naturales (utilizando sol y agua), *requieren poco esfuerzo y sin necesidad de equipos especiales.* (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)
- Procesos modernos (utilizando químicos con mayor efectividad), *Son efectivos pero sus costos se pueden elevar ya que requieren químicos y equipos más sofisticados; los preservantes no deben contener sustancias tóxicas para las personas, ni para los animales.* (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016) Con estos procesos se consigue aumentar la duración de 2 a 3 años sin protección hasta 20 años al ser inmunizados o tratados.

Dentro de los métodos convencionales o naturales de preservación se tienen las siguientes opciones:

Ahumado

Las cañas de bambú se almacenan en sitios cerrados expuestos al humo. Durante este tratamiento algunas sustancias tóxicas se depositan en el interior del culmo que contribuyen a que adquieran alguna resistencia, pudiendo destruir el almidón contenido en las cañas. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Encalado

Consiste en que las cañas de bambú son pintadas con cal, además del efecto ornamental del color blanco, se espera una prolongación de la vida útil del material, se reduce la absorción de agua con este tratamiento lo que conlleva a una mayor resistencia. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Inmersión en agua salada

Durante la inmersión los almidones y azúcares contenidos en las cañas son expulsados o degradados por bacterias, de allí que la resistencia contra los insectos se incrementa. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Protección por diseño

Muchos daños pueden evitarse mediante la ubicación de las construcciones con bambú sobre una base de cemento para evitar ponerlos directamente en el suelo. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Curado por inmersión en barro

Técnica natural tradicional en Vietnam aplicada en la especie de bambú “*Tam Vong*” que consiste en sumergir y empapar los culmos en barro y después ahumarlos (Lynch 2017), logrando alcanzar la máxima calidad y durabilidad a largo plazo del material con técnicas de bajo impacto ambiental, lo que contribuye a realizar construcciones sostenibles.

Curado por fuego

Técnica asiática basada en la técnica *yakisugi* (comúnmente mal llamado *Shou Sugi Ban*) de Japón para el tratamiento de la madera contra insectos y los efectos ambientales como el sol, la lluvia y la humedad incluso contra el fuego, la cual logra su efectividad al quemar entre 3 y 4 milímetros de madera generando una capa de carbón a la cual se le aplica aceite mineral o de linaza como sellante y se da mantenimiento cada 10 años para evitar los daños descritos.

Según el autor Jorge A. Morán Ubidia este método es utilizado comúnmente en Colombia y Brasil, consistiendo en calentar los culmos de bambú en fogatas construidas para este fin. El método requiere de conocimiento práctico para determinar la intensidad de calor, evitando el colapso de los culmos por exceso de exposición, para lo cual se rotan los culmos sobre su eje longitudinal para aplicar calor a toda la superficie.

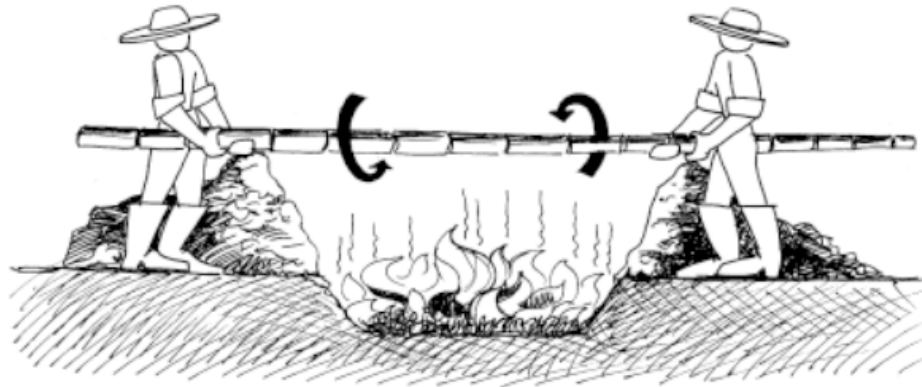


Imagen 64: Procedimiento curado de culmos por calor.
Fuente: Morán Ubidia (2000)

Una alternativa al uso de fogatas es realizar este tratamiento con antorchas a gas propano o gas butano, cuidando la distancia entre la llama y la superficie del culmo, así como también el tiempo de exposición del culmo al fuego.

Dentro de los procesos modernos de preservación se tienen las siguientes opciones:

Tratamiento con diésel

Este método es muy efectivo y económico, no tiene efecto negativo en la salud de las personas y animales. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016) Técnica Taiwanesa de tratamiento preventivo asequible que se realiza una sola vez durante años, consistente en perforar por medio de barreno y brocas para madera Ø 3/16" o 1/8" en cada cámara para inyectar diésel sin diluir logrando inmunizar el interior de cada cámara. A las piezas que se corten para realizar uniones se les aplica diésel con brocha.

La aplicación recomendada es de 5 a 10 centímetros cúbicos de diésel, según el grosor de la caña. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Al completar la inmunización por inyección del bambú, se tapan los orificios realizados con tarugos de bambú.

Método del tanque abierto

Los culmos se sumergen en soluciones salinas por varios días, pudiéndose combinar con agua hirviendo y adicionar componentes como sulfato de cobre y cromatos de zinc. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Método Boucherie

Conocido también como método de desplazamiento de savia se hace por medio de una solución a base de bórax y ácido bórico, debe realizarse cuando el bambú está recién cortado.

Este método consiste en un tanque que posee la solución y un sistema de presión o compresor que con la presión que ejerce vence la resistencia de la savia que tiene el bambú sustituyéndola por la solución. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Tratamiento con presión

Se realiza con el uso de equipo denominado autoclave que aplica presión lo que permite que penetre una solución que preserva el bambú como el bórax. Este método es muy costoso ya que requiere mayor instalación y tecnología. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación 2016)

Por inmersión en agua mezclada con soda cáustica

Se realiza hirviendo los culmos de bambú a una temperatura de 94 a 100 C, por 30 minutos, en una mezcla de agua y soda caustica (NaOH) al 1%. Es indispensable no excederse con el tiempo de inmersión, ya que la soda cáustica puede atacar superficialmente las células parénquimas cuando deja demasiado tiempo. (Peña 2015)

Por inmersión en agua mezclada con pentaborato o sales de bórax

Uno de los sistemas más empleado comúnmente, considerado agente de preservación de madera más respetuoso con el medio ambiente, se describe el proceso de preservación por inmersión:

Proceso por inmersión

- 1) Perforar longitudinalmente todos los nudos de los culmos con una varilla de acero con una broca de Ø 3/8" o Ø 5/16" soldada al extremo.

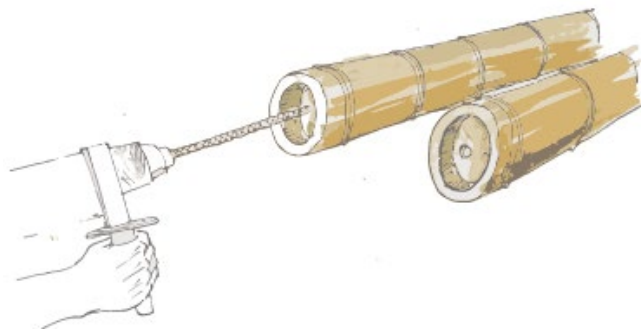


Imagen 65: Perforación de los nudos del culmo

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

- 2) Preparar la piscina de inmersión con agua al 95% del volumen y 5 % de solución de bórax (debe ser de ph neutral compuesta por 50% ácido bórico y 50% óxido de bórax en polvo disueltos en agua tibia).

El 5% es equivalente a 50 kg/m³ siendo 25 kg ácido bórico + 25 kg óxido bórax, rinden para preservar 100 o más culmos de bambú, permanece activa de 1 a 2 meses (tiempo en que se pueden tratar más culmos).

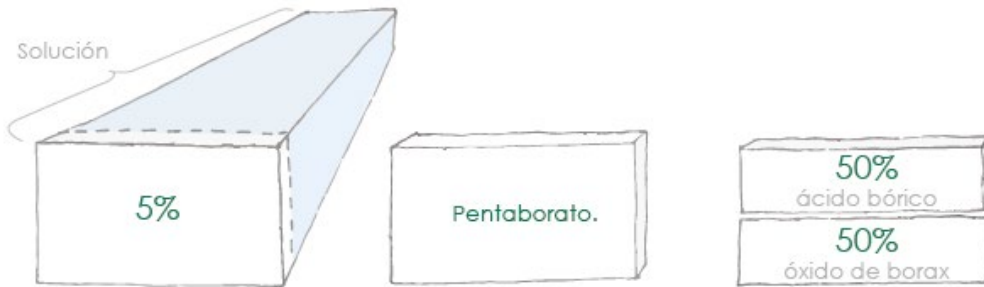


Imagen 66: Proporción de la solución de pentaborato

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

- 3) Sumergir los culmos en la solución colocando piedras o peso sobre ellos durante 24 horas en agua tibia o durante 4 días en agua a temperatura ambiente.

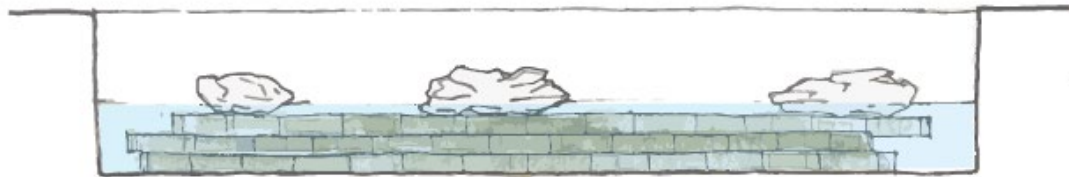


Imagen 67: Inmersión de culmos en la solución de pentaborato

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

- 4) Sacar los culmos para dejar escurrir el líquido e iniciar el proceso de limpieza.

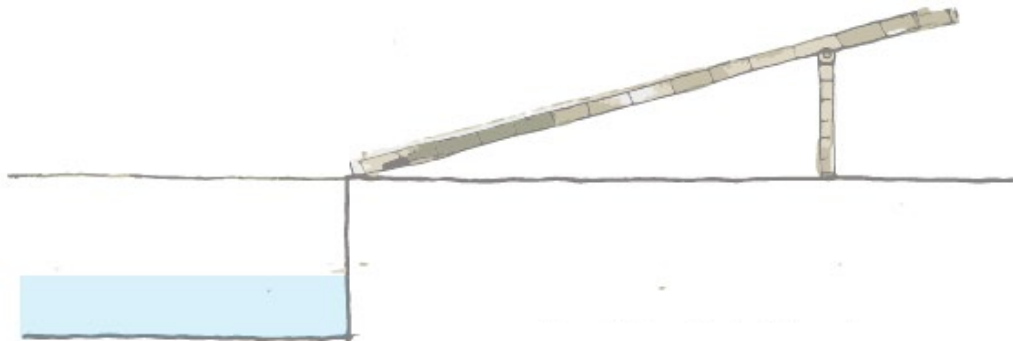


Imagen 68: Escurrimiento de culmos

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

LIMPIEZA

El proceso consiste en remover musgo o líquenes presentes en los culmos del bambú, para su efecto se puede utilizar esponja o cepillos de cerdas plásticas que no debiliten y dañen la cáscara de los culmos.

BLANQUEAMIENTO

Consiste en exponer los culmos al sol durante 1 mes rotándolos constantemente durante el día con el objetivo de lograr una tonalidad uniforme, evitando manchas y rajaduras por sobrecalentamiento.



Imagen 69: Blanqueamiento de culmos.
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

SECADO

Proceso que tiene el fin de reducir el porcentaje de humedad de los culmos hasta llegar entre 15 - 17% de humedad. Existen 2 métodos:

- 1) Tradicional que se realiza bajo la sombra en una galera con amplios alerones y sin paredes para que circule el aire, durante 2 o 3 meses.
- 2) Acelerado con la utilización de un soplador eléctrico de aire caliente llamado "pulpo" se estima que se puede reducir el proceso en 10 días.

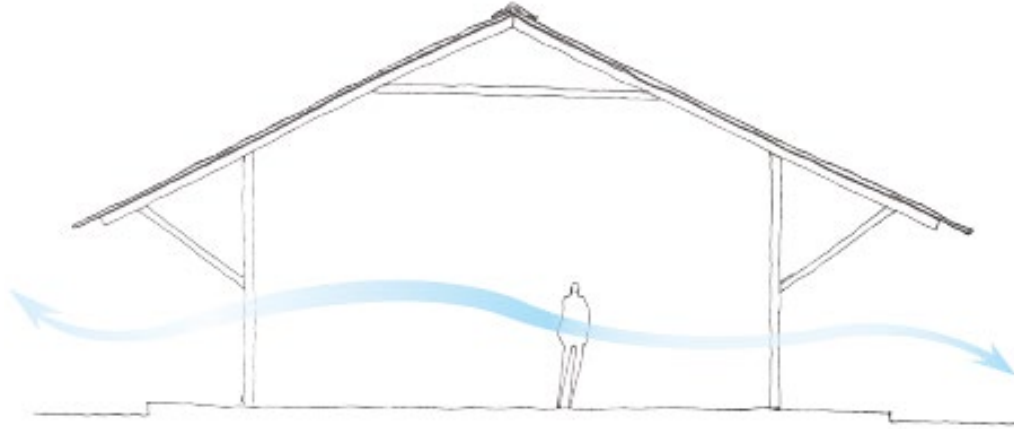


Imagen 70: Secado tradicional de culmos
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

CLASIFICACIÓN

En el manual de Lucila Aguilar Arquitectos, se propone la siguiente clasificación:

GRADO	CARACTERÍSTICAS	USOS	OBSERVACIONES
A	<p>Culmos fuertes y rectos, clasificar por diámetros.</p> <p>Diámetro: Mínimo 9 cm Espesor de pared: Mínimo 8 mm Longitud: Mínimo 6.5 m</p>	<p>Columnas Vigas Latas Esterilla</p>	<p>Pertenece a la basa y sobrepasa de la caña de bambú</p>
B	<p>Culmos fuertes ligeramente curvados, clasificar por diámetros.</p> <p>Diámetro: Mínimo 9 cm Espesor de pared: Mínimo 8 mm Longitud: Mínimo 6.5 m</p>	<p>Columnas Vigas Latas Esterilla</p>	<p>Pertenece de la basa hasta el varillón de la caña de bambú</p>
C	<p>Culmos con más de una curva y con ligeras grietas. Útil solo en secciones.</p> <p>Diámetro: Mínimo 9 cm Espesor de pared: Mínimo 5 mm Longitud: Mínimo 6.5 m</p>	<p>Latas Esterilla</p>	<p>Pertenece de la basa hasta el varillón de la caña de bambú</p>

Tabla 7: Tabla de clasificación de bambú según la calidad de culmos.
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

En el manual se recomienda no aceptar los culmos de bambú si presentan las siguientes características:

- Culmos aplastados o con rajaduras de más de dos entrenudos.
- Culmos con plagas u hongos.
- Culmos verdes.
- Culmos con pared menor a 8 mm.
- Culmos con diámetro menor a 8 cm.
- Culmos viché menores de 4 años de edad. (Lucila Aguilar Arquitectos 2017)

En el manual de Lucila Aguilar Arquitectos se recomienda un método de revisión de los culmos para realizar la clasificación de los mismo tomando como base la tabla anterior.

ALMACENAMIENTO

Al terminar la clasificación de los culmos se deberán almacenar en un área cubierta con amplios alerones que los cubran del sol y la lluvia, la galera deberá ser sin muros para asegurar la circulación del aire.

Los culmos se guardarán separados en grupos según su calidad, los mismo se apilarán por capas separadas entre ellos para permitir la circulación del aire.

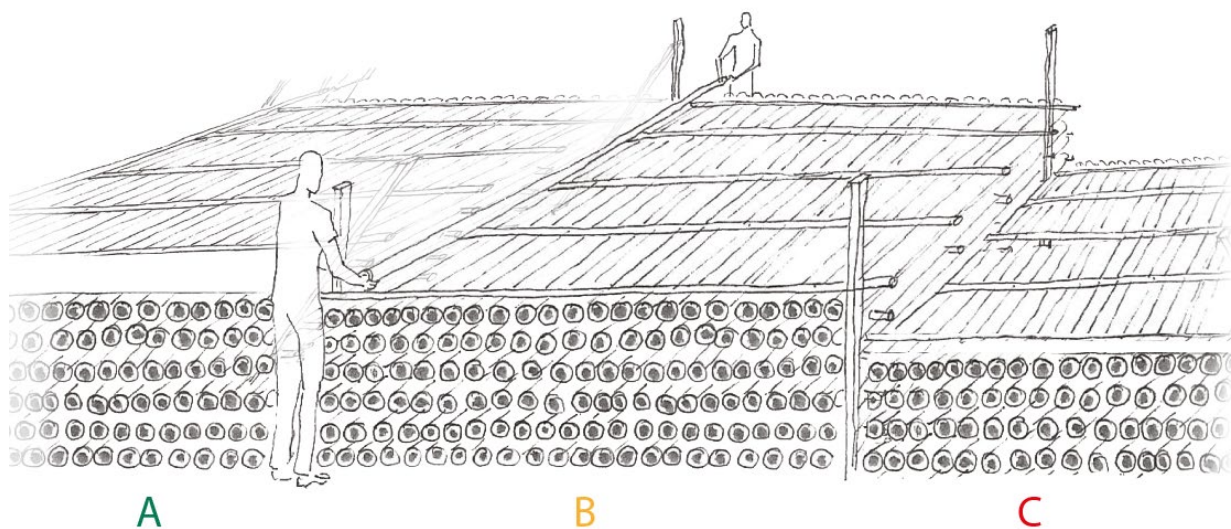


Imagen 71: Almacenamiento de culmos clasificados por calidad.

Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos (2017)

CONTROL DE CALIDAD

Por ser el bambú un material natural, cuyas características varían a lo largo de su proceso de transformación en material de construcción se debe establecer y aplicar un procedimiento de control de calidad revisando los siguientes puntos, previo a su clasificación y almacenamiento (este control aplica a culmos de bambú comprado):

- Evaluar la madurez de los culmos visibles en la sección transversal del mismo.
- Monitorear la inmunización de los culmos realizando visitas a la planta del proveedor.
- Verificar la humedad de los culmos por medio del uso de humidómetro.
- Realizar inspecciones visuales a los culmos para verificar que estén libres de manchas y rajaduras por sobrecalentamiento.
- Medir el diámetro de los culmos, solo aceptar culmos mayores o iguales a 8 centímetros de diámetro.

Casos de estudio internacionales

Proyectos internacionales contruidos con bambú como material estructural

El Jardín de Bambú

Atelier REP

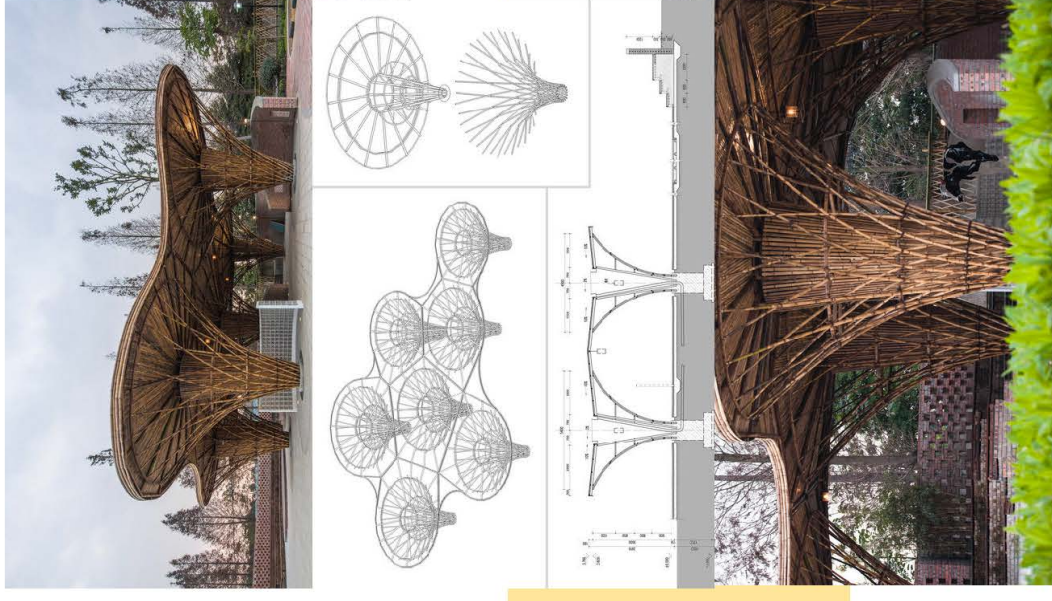
Chengdu, China

2015

Considerada como un área para experimentar con diferentes tipos de estructura de bambú.

Destaca el pabellón formado por 7 apoyos en forma de paraguas al usar las barras de bambú tanto en elementos curvos así como en superficies regladas.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/789822/el-jardin-de-bambu-atelier-rep>



Templo Iuum

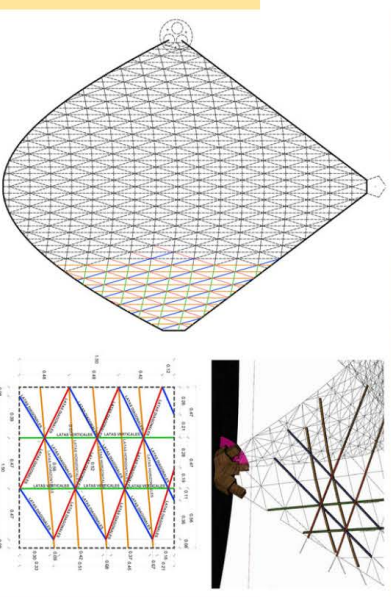
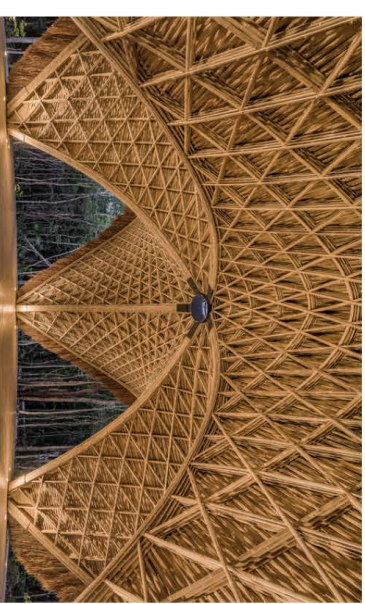
CO-LAB Design Office

Tulum, México

2019

Área de uso flexible para meditación
practicar yoga, realizar talleres y
reuniones.

Destaca el uso de bambú para
desarrollar una palapa formada por 5
hiperboloides de fajas de bambú,
como una red triangular, anclados a
arcos principales que se anclan a
platinas metálicas en zapatas de
concreto, los 5 hiperboloides están
unidos a un anillo concéntrico de
acero.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919123/templo-ium-co-lab-design-office>

Restaurante Son La

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

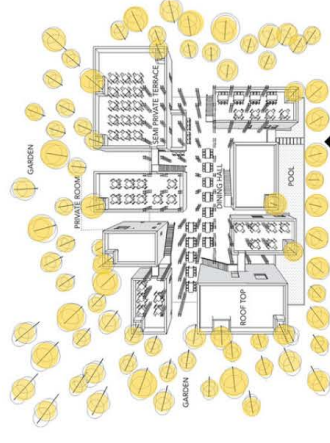
Son La, Vietnam 2014

Restaurante para turistas, uso de materiales locales como bambú "Luong" y piedra de cantera.

Destaca el uso de bambú para desarrollar 98 pilares de 4 bambús, así como para las vigas entretrejidas, el techo plano También es de bambú con lámina transparente sobre el bambú.

El bambú fue curado con un técnica tradicional del lugar: sumergido en barro y luego ahumando.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/756247/restaurante-son-la-vo-trong-nghia-architects>



Centro Comunitario Diamond

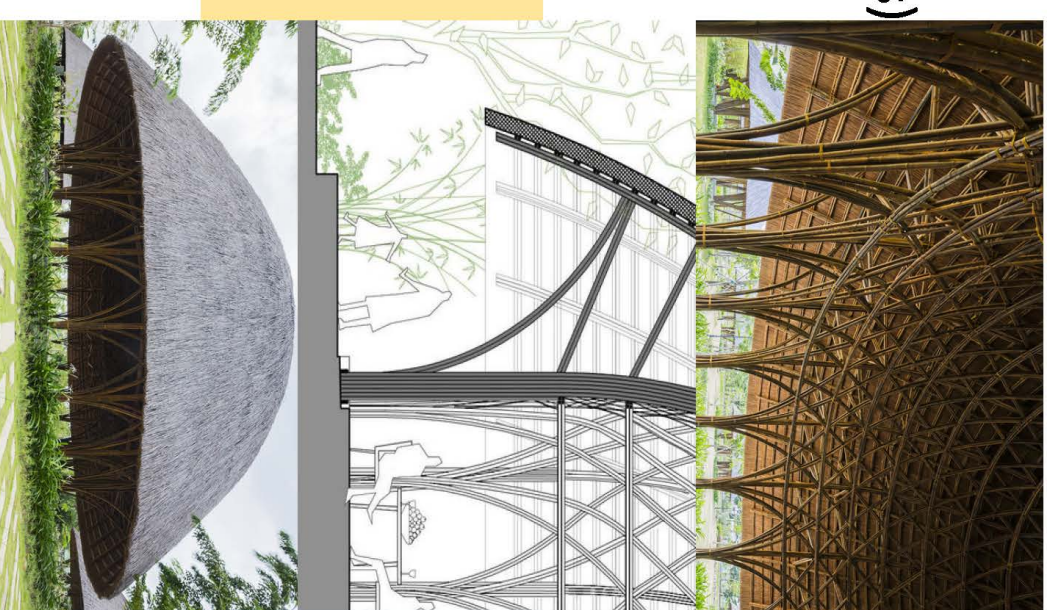
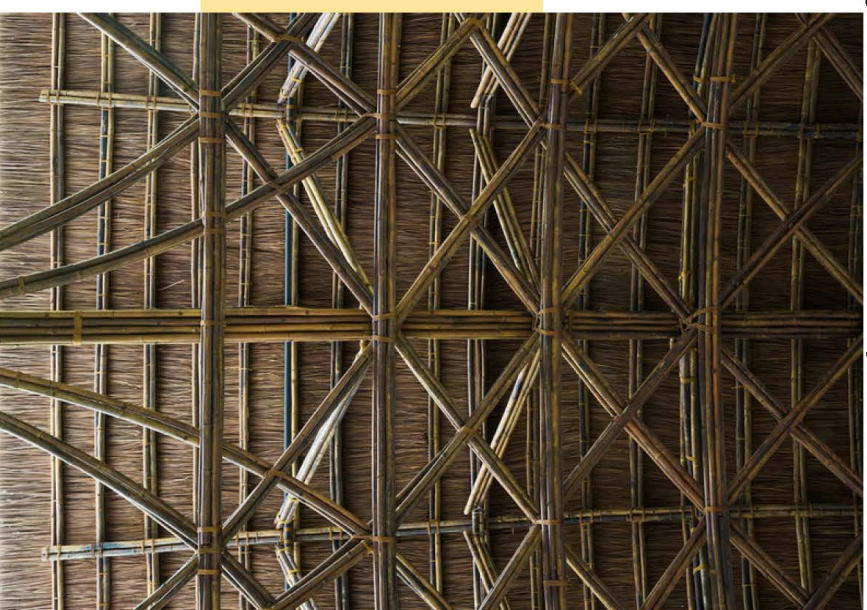
Island Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Ho Chi Minh City, Vietnam
2014

Conjunto de pabellones destinados para fiestas, banquetes, conferencias y restaurante en el futuro.

Destaca el uso de bambú para dos cúpulas de 24 metros de diámetro y 12.5 m de altura, techo de estructura doble para generar aleros que protegen al bambú del sol.

La claraboya en la parte más alta del techo ofrece iluminación natural difusa durante el día, permitiendo la salida de aire caliente.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/779141/centro-comunitario-diamond-island-vo-trong-nghia-architects>

Sangkep

IBUKU

Abiansemai, Indonesia

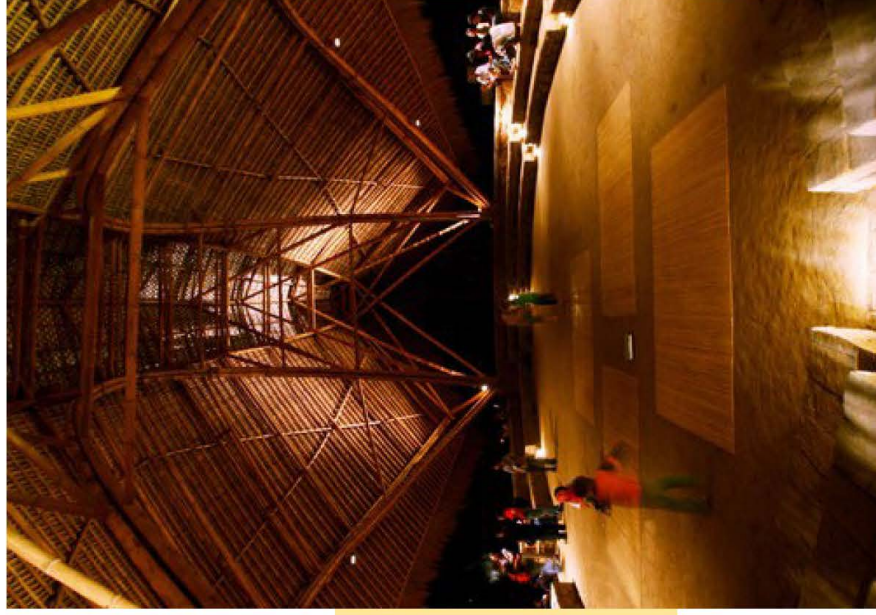
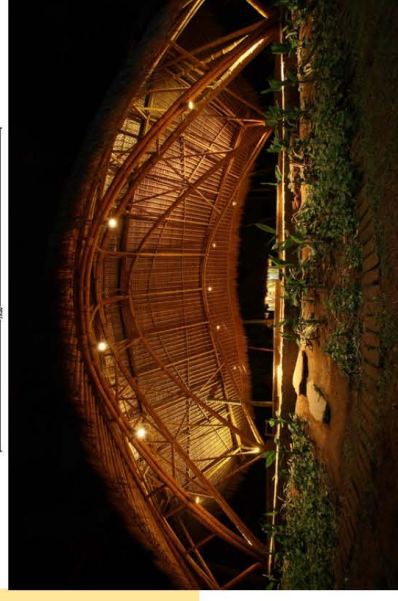
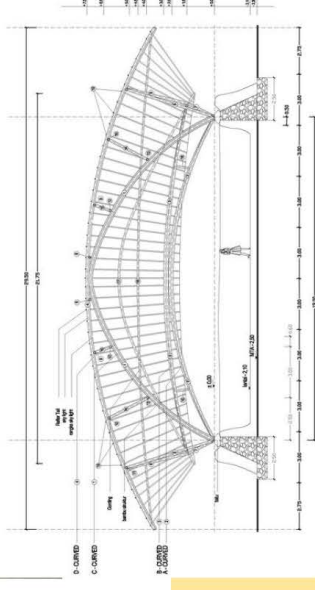
2007

Espacio multipropósito para presentaciones y eventos con capacidad para 300 personas.

Estructura compuesta por 4 arcos principales de 19-20 m en el sentido largo y 9-10 m en el corto, que descansan en un anillo de piedra, que se usa como tribuna.

Los arcos se construyeron con segmentos de bambú unidos entre sí, permitiendo obtener la curva del arco deseado, una abertura cenital provee de iluminación natural durante el día.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/887424/sangkep-ibuku>



NYMBÚ: módulo observatorio de aves

estudiantes de la Pontificia Universidad Católica del Perú

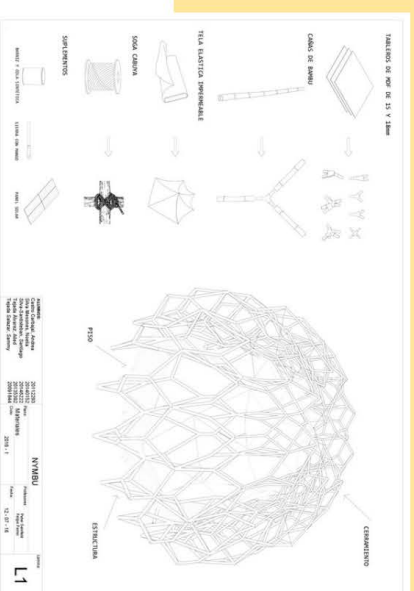
Cusco, Perú

2016

Estructura temporal para turistas, destinada a la observación de aves.

Destaca que para realizar la construcción de la estructura se utilizaron pedazos de bambú unidos entre sí por medio de uniones cortadas en MDF con máquinas CNC.

Las uniones prefabricadas en máquinas CNC permiten estandarizar la producción y replicar el módulo. Resultando una alternativa accesible para los puntos de unión.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/874973/nymbu-modulo-observatorio-de-aves-en-cusco>

LA CEIBA

Lucila Aguilar Arquitectos

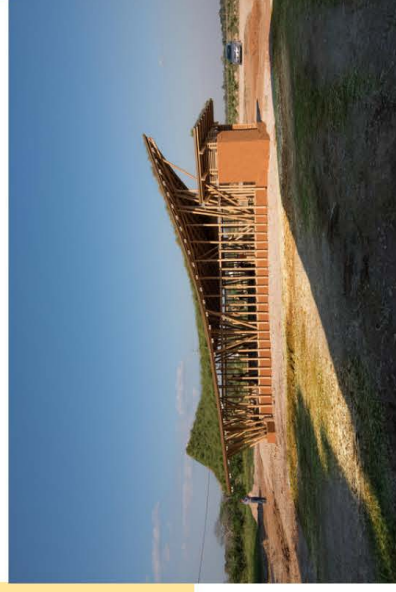
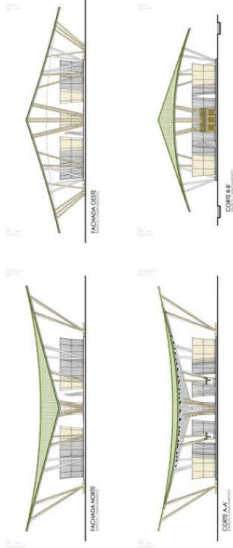
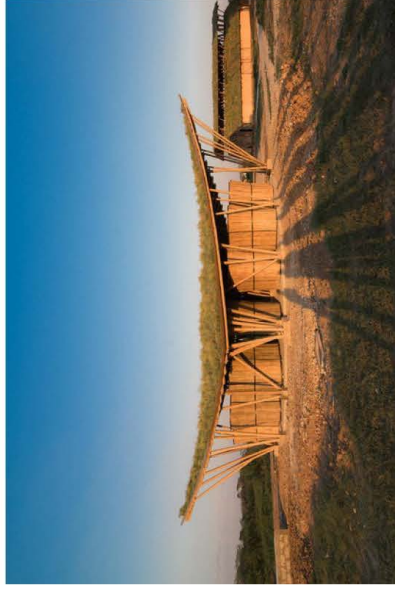
Chiapas, México 2016

Infraestructura para Uumbal, empresa agroforestal comprometida con la sustentabilidad y el cuidado del medio ambiente.

Destaca el módulo de baños y duchas, cuyo techo es un parabolóide hiperbólico, la estructura principal del mismo está realizado en una retícula de bambú doble soportado por 5 apoyos principales y 10 apoyos secundarios.

Las uniones de los bambús son realizadas con varillas roscadas con tuercas y roldana.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>



Centro de Conferencias Dai Lai

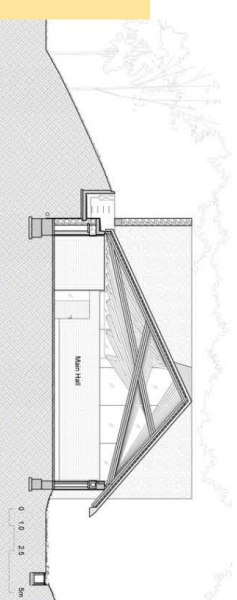
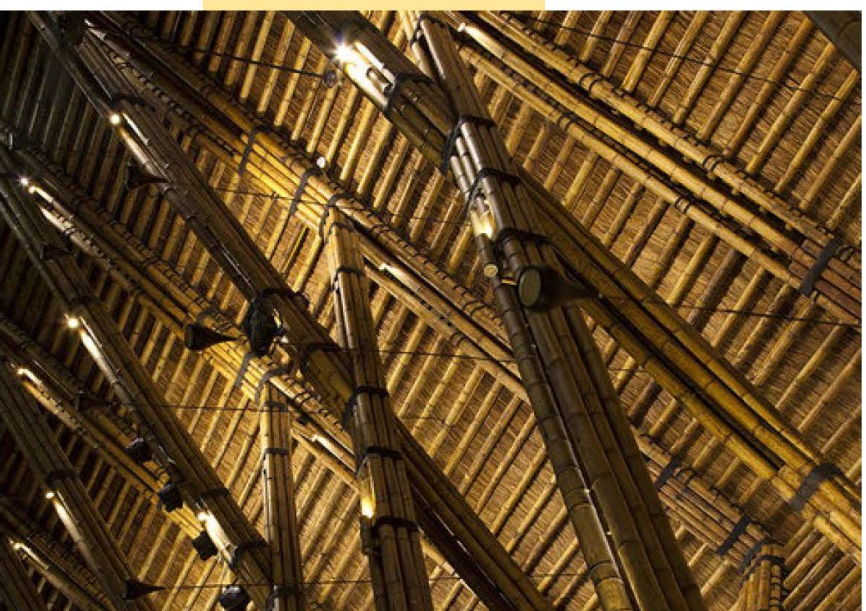
Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Vinh Phuc province, Vietnam 2012

Complejo residencial para descanso de los ciudadanos durante los fines de semana en medio de la naturaleza.

Destaca el bastidor principal en el centro de conferencias, la distancia que salva el bastidor de bambú llega a los 13.60 m adaptándose a la forma curva de la cubierta.

La dinámica estructura de bambú permite a los visitantes sentir los espacios más amplios y abiertos.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-223979/centro-de-conferencias-dai-lai-vo-trong-nghia-architects>

Pabellón de Vietnam-Expo Milán 2015

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

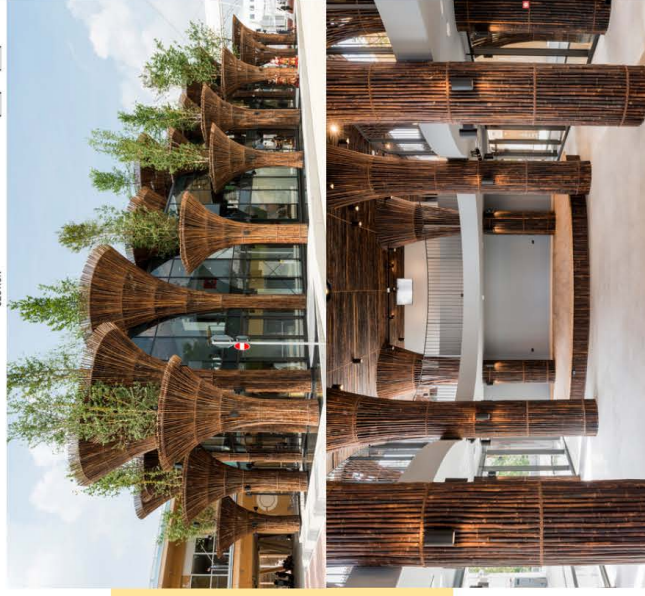
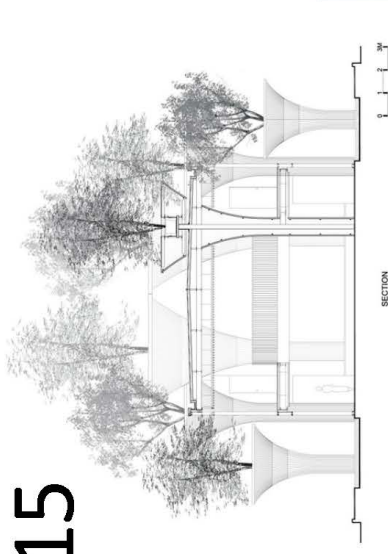
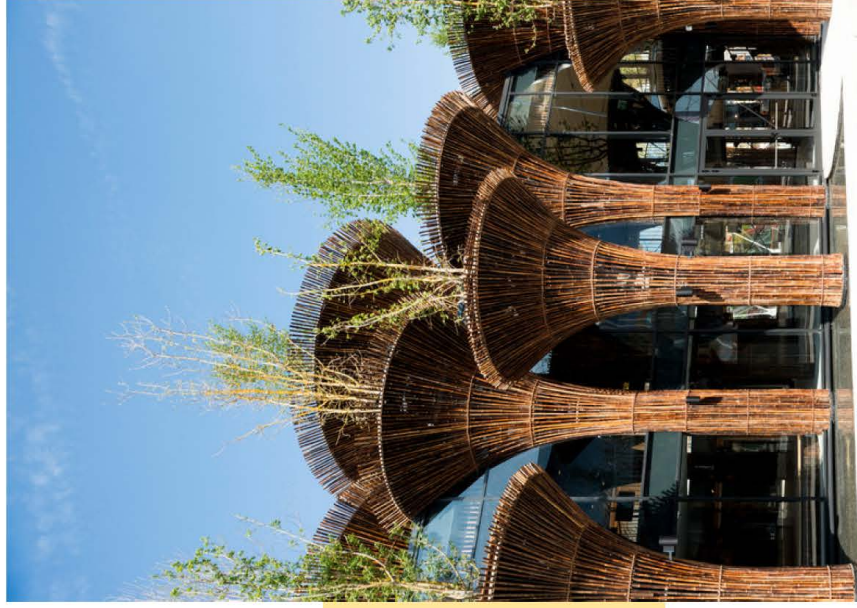
Milán, Italia

2015

Pabellón temporal edificado para la Expo Milán del 2015, que duro 6 meses. El lema del diseño fue "Alimentar el planeta, energía para la vida".

Destaca el uso del bambú como representante de la cultura vietnamita, al revestir las columnas.

El revestimiento de bambú proporciona textura al edificio, generando paz mental a los visitantes.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/767084/pabellon-de-vietnam-expo-milan-2015-vo-trong-nghia-architects>

Bar de Playa Naman Retreat

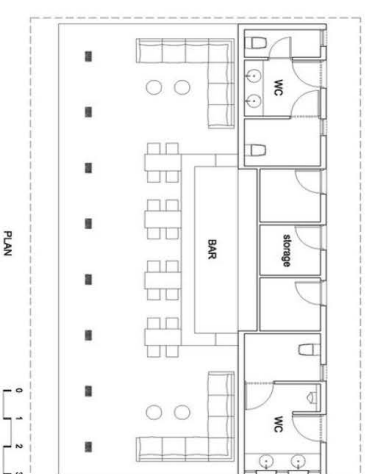
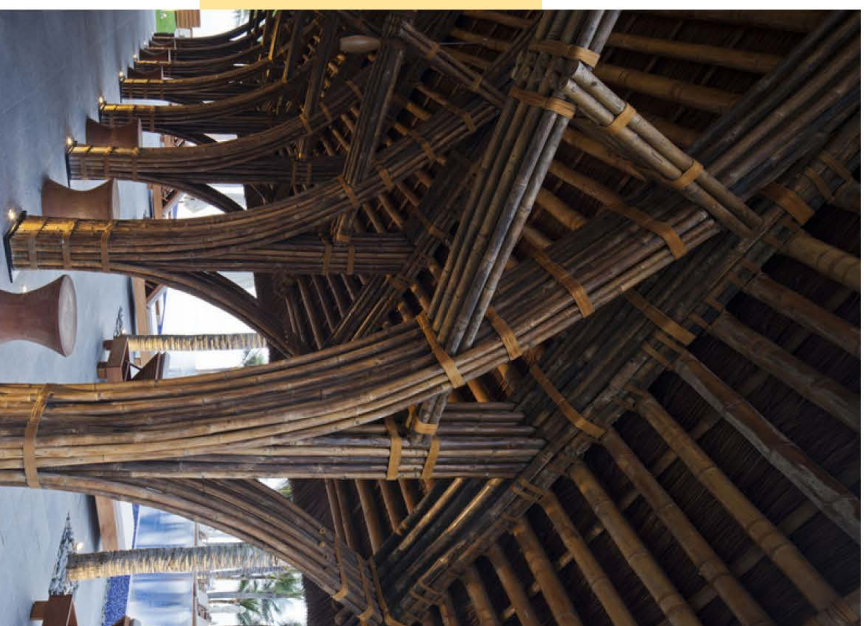
Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Ngũ Hành Sơn, Vietnam 2015

Bar de playa construido en piedra y bambú.

Destacan los 8 marcos de bambú fabricados con bambús rectos y curvo conectados por uñas de bambú y cuerdas. El techo de la cubierta a dos aguas es de paja natural.

El bambú fue tratado naturalmente con flexión por fuego, sumergido en agua y fumigado posteriormente.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/774761/bar-de-playa-naman-retreat-vo-trong-nghia-architects>

Restaurante y Bar Hay Hay

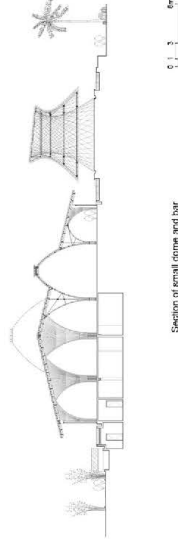
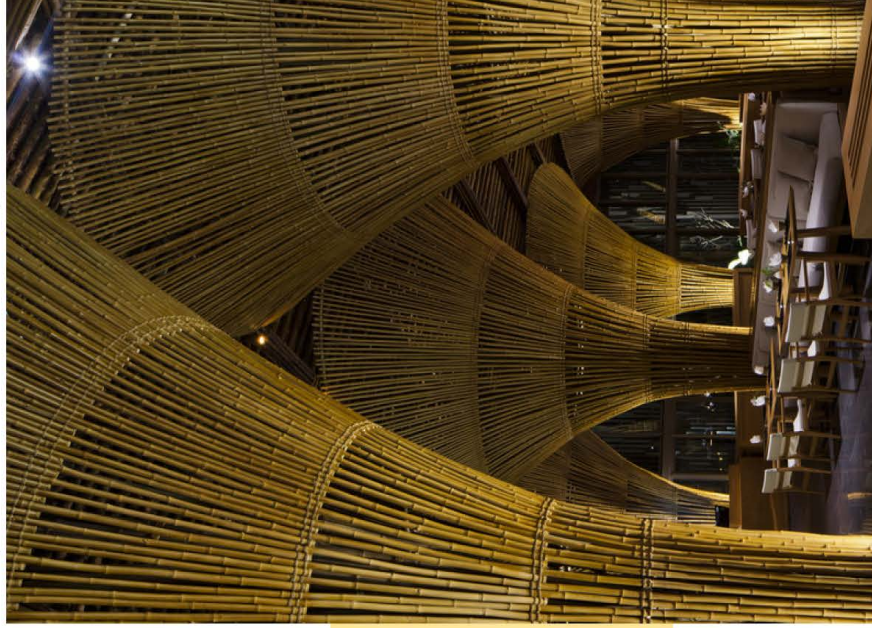
Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Ngũ Hành Sơn, Vietnam 2015

Restaurante y bar de playa construido en bambú con muro cortina de vidrio y concreto.

Destaca el techo a dos aguas sostenido en 29 columnas cónicas de bambú conectadas a la estructura del techo consistente en una red de vigas. También destaca la estructura del bar un hiperboloide, un cilindro que gira en 2 direcciones de 8.5 m de altura, bambú tratado con flexión por fuego, sumergido en agua y fumigado posteriormente.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/775107/hay-hay-restaurant-and-bar-vo-trong-nghia-architects>



Restaurante Roc Von

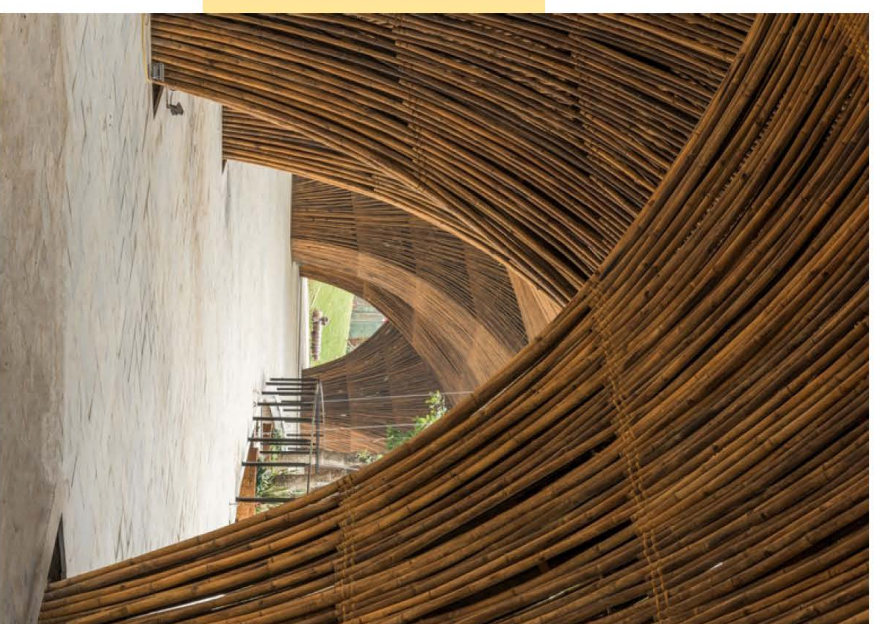
Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Phú Cát, Vietnam 2015

Restaurante construido con bambú, situado al lado de la carretera frente a un lago.

Destaca la estructura del área de mesas de forma curva soportada en 12 columnas de bambú de forma creciente y el techo plano inclinado.

El bambú fue tratado con un método natural tradicional vietnamita para prolongar la vida de la estructura, contribuyendo a un enfoque de construcción sostenible del proyecto.



<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/785861/restaurante-roc-von-vo-trong-nghia-architects>

Bamboo wing

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Hanoi, Vietnam

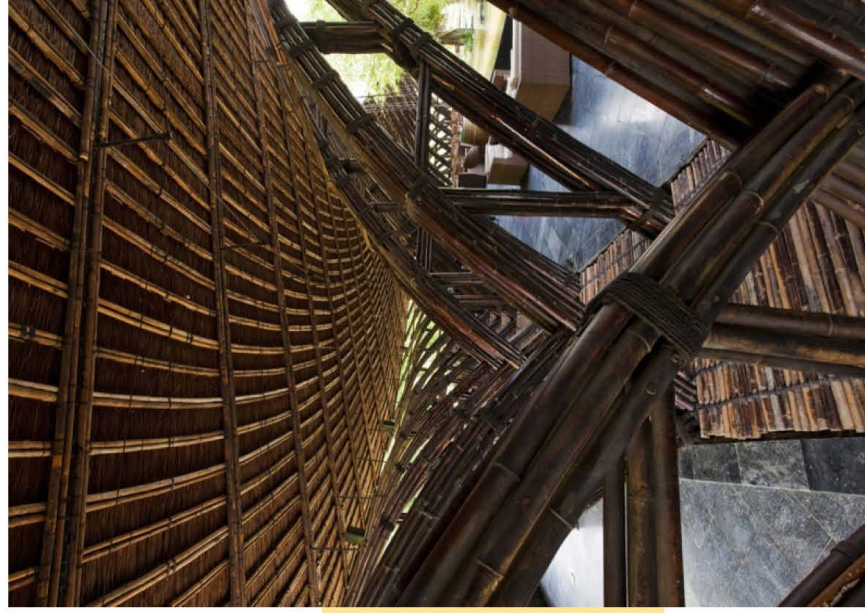
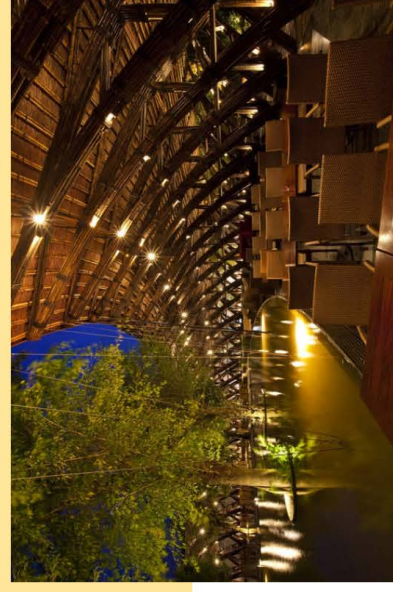
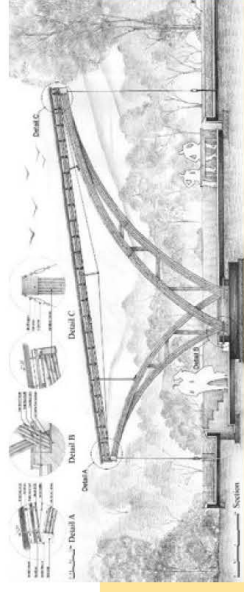
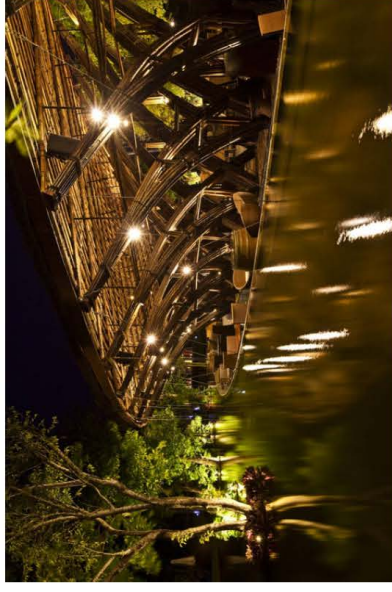
2010

Restaurante construido con bambú como material estructural.

Destaca la estructura del área de mesas de forma curva soportada por vigas armadas de bambú como joists curvos y techo plano inclinado, que proveen un espacio de 12 metros sin otra columna vertical.

El bambú aplicado en este proyecto establece un precedente en las posibilidades de usar el bambú como material estructural.

<https://www.archdaily.com/219880/bamboo-wing-vo-trong-nghia>



Nocenco café

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

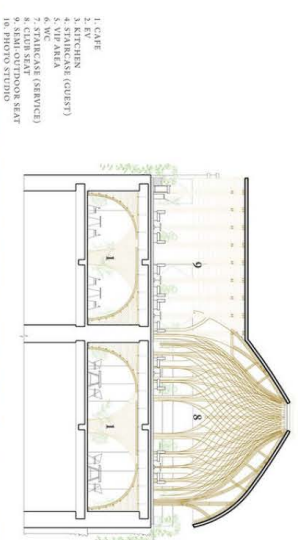
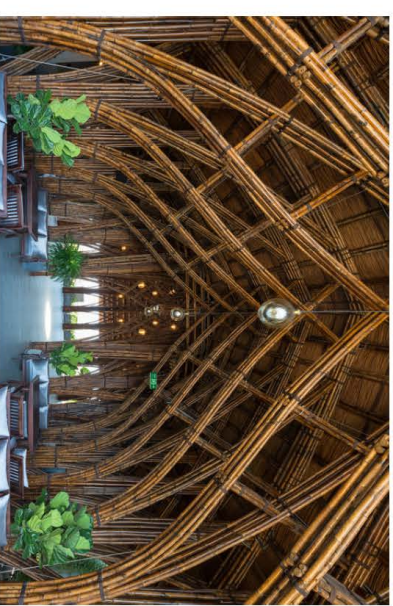
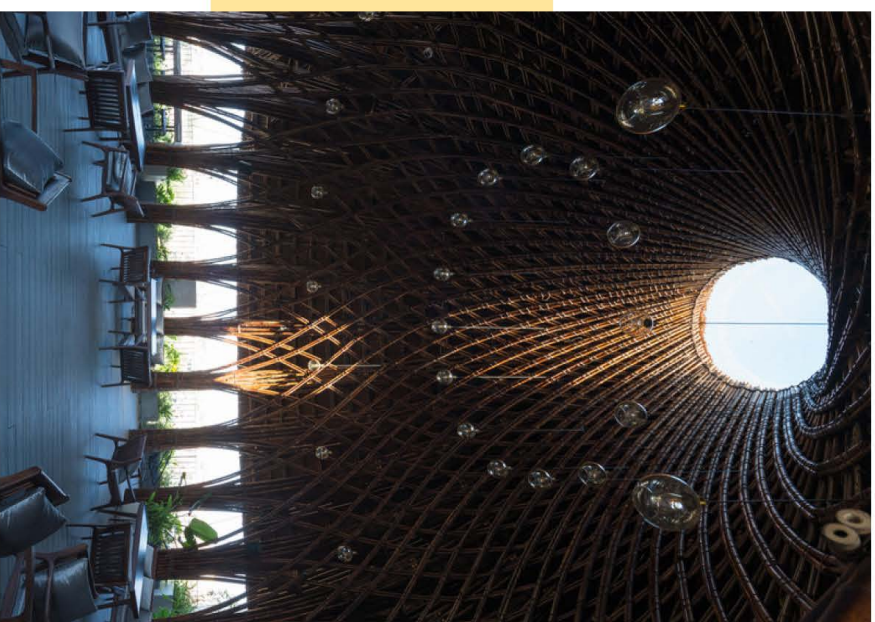
Vinh, Vietnam

2018

Renovación de un restaurante en el cual se usó el bambú como elemento decorativo y como material estructural.

Destaca la estructura del techo en la azotea, conformada por una cúpula con luz cenital y techo a dos aguas soportado por marcos de bambú.

Este Proyecto evidencia la flexibilidad de utilización del bambú al ser usado como elemento decorativo y como material estructural.



<https://www.archdaily.com/896855/nocenco-cafe-vtn-architects>

Ting Xi Bamboo Pavilion

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Xiamen, China

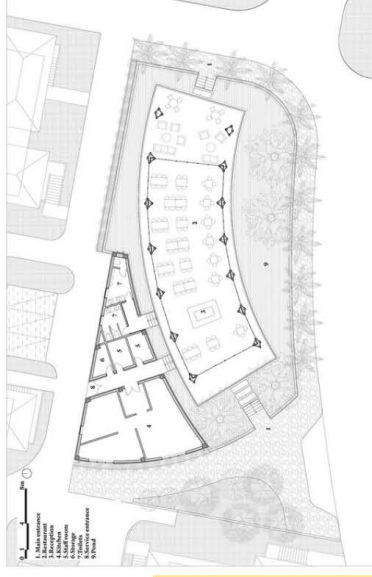
2018

Restaurante en el cual se usó el bambú como material estructural.

Destaca la estructura del área de mesas conformada por 14 columnas espaciadas 8 m para formar 7 marcos estructurales que soportan 14 m en el ancho del techo a dos aguas.

El bambú también es entretrejado formando una piel decorativa aparte del uso estructural.

<https://www.archdaily.com/884816/vtn-architects-creates-airtight-bamboo-pavilion-for-restaurant-in-xiamen>



Naman Retreat Conference Hall

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

Ngũ Hành Sơn, Vietnam

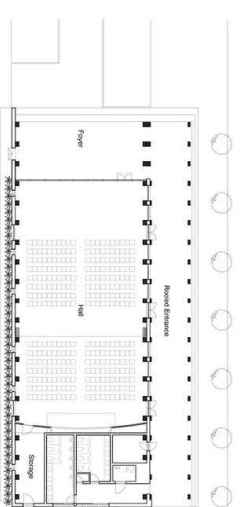
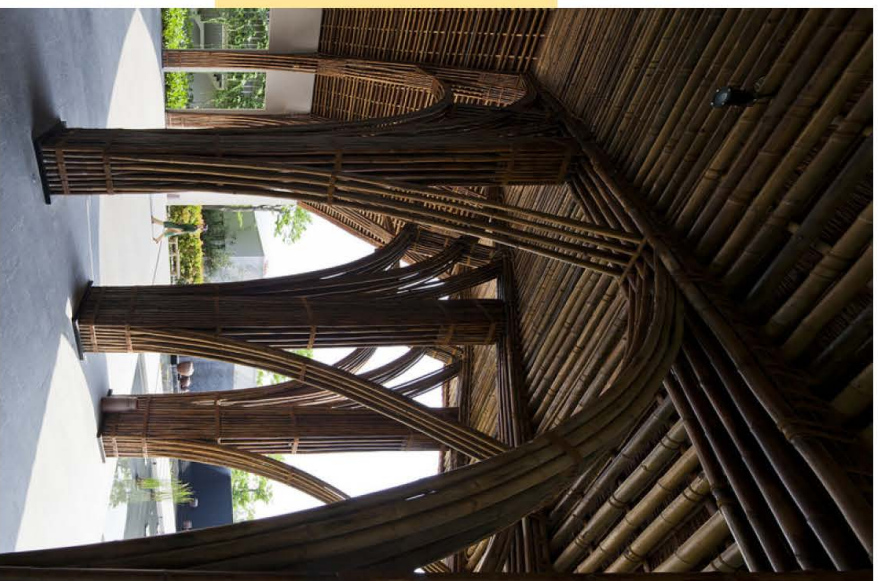
2015

Centro de conferencias del resort, en el cual se usó el bambú como material estructural.

Destaca la estructura del salón principal con 20 cercas estructurales con luz de 13.5 m y alto de 9.5 m que soportan el techo a dos aguas y el pasillo exterior.

La forma orgánica de las cercas estructurales poseen belleza propia, evitando la decoración adicional.

<https://www.archdaily.com/775650/naman-retreat-conference-hall-vo-trong-nghia-architects>



wNw Café

Vo Trong Nghia Architects (VTN architects)

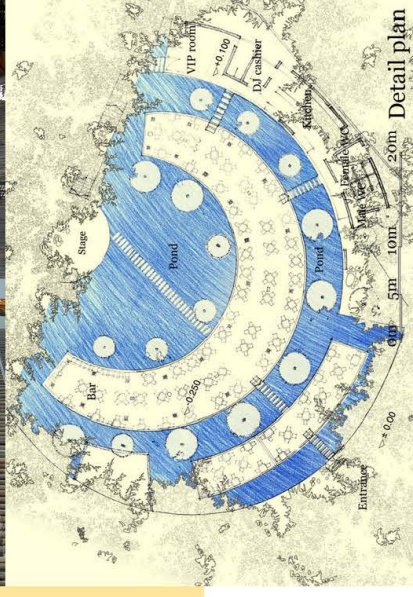
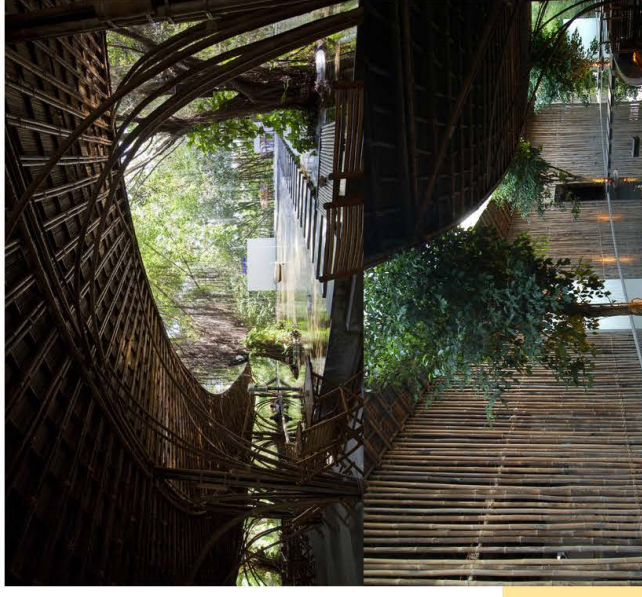
Binh Duong Province, Vietnam 2006

Café y restaurante con espejo de agua simulando un lago artificial, en el cual se usó el bambú como material estructural.

Destaca la estructura del techo construida enteramente en bambú, llegando a usar alrededor de 7,000 elementos de bambú, sin elementos de concreto, únicamente se emplearon cables entre las uniones.

El bambú del proyecto fue tratado y protegido usando una técnica natural tradicional vietnamita.

<https://www.archdaily.com/226203/wnw-cafe-vo-trong-nghia>



Pabellón de Deportes de Bambú

Chiangmai Life Construction

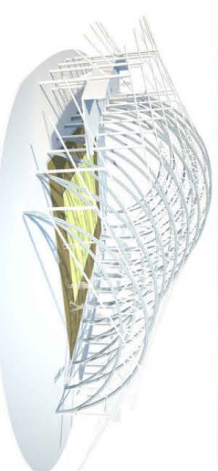
เชียงใหม่, Tailandia

2017

Pabellón de deportes construido para la escuela internacional Panyaden, para realizar juegos deportivos y actividades variadas, en el cual se usó el bambú como material estructural.

Destaca la estructura del pabellón construida enteramente en bambú, uniendo varias barras por medio de lazo natural y anclajes con varillas roscadas en las uniones.

La forma topológica y orgánica del conjunto establece nuevos límites en la utilización del bambú con material estructural.



<https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

Los anteriores proyectos internacionales fueron construidos utilizando el bambú como material de acabado y decorativo, así también, como material estructural, teniendo en común que las implementaciones de la estructura son fuera de lo típico generando formas orgánicas con base geométrica, así como la aplicación de sistemas estructurales estudiados en el capítulo de fundamentación estructural del presente trabajo de tesis.

La aplicación conjunta de conceptos de sistemas estructurales con los conceptos de geometría euclidiana y la creatividad del diseñador permite generar proyectos expresivos que evidencian la flexibilidad y potencialidad del bambú, cuyas características físicas y mecánicas permiten implementarlo con alto valor estético. Por lo que se puede considerar al bambú como una alternativa segura estructuralmente con alto valor ecológico.

Casos de estudio nacionales

Proyectos en Guatemala contruidos con bambú como material estructural

Puentes de Bambú

Laboratorios Facultad de Ingeniería USAC

Guatemala, Guatemala 2018

Construidos para realizar estudios de resistencia del bambú, para aplicarlo como opción de construcción de puentes peatonales.

Destaca la luz efectiva, aproximadamente entre 5 y 6 m de distancia. Se construyeron 2 puentes uno sin apoyos de bambú y otro con apoyos de bambú.

Fotografías propias, tomadas el 07 marzo 2020



Edificio circular de Bambú

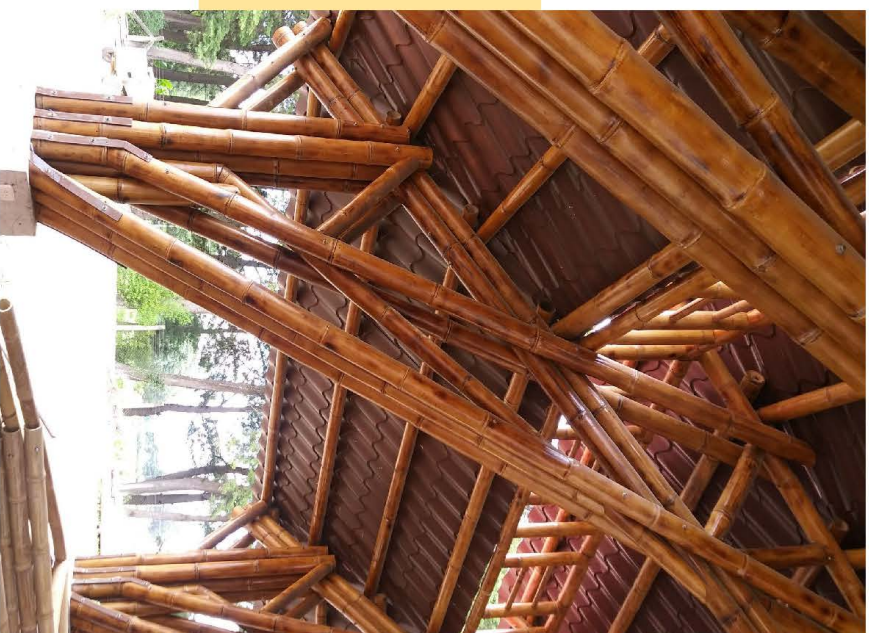
Misión técnica China-Taiwán

Barenas, Guatemala

2019

Área de uso flexible para conferencias, talleres y reuniones. Pertenecce al complejo CENTRO DE BAMBÚ EN GUATEMALA.

Destaca el espacio central libre al no requerir apoyo central, otorgando flexibilidad de utilización, también resalta la cúpula central que provee de iluminación natural al interior. El bambú fue tratado con fuego y capa de barniz.



Fotografías propias, tomadas el 14 agosto 2020

Portal de Ingreso Vehicular

Misión técnica China-Taiwán

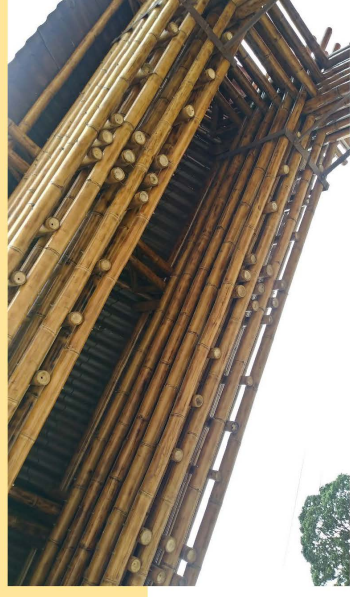
Barcenas, Guatemala 2019

Portal de ingreso con el objetivo de jerarquizar el ingreso vehicular al complejo CENTRO DE BAMBÚ EN GUATEMALA.

Destaca la altura libre 7 metros y la luz entre apoyos entre 6 a 7 metros, para permitir el ingreso de camiones grandes y maquinaria pesada, el portal es formado por un tejido de culmos de bambú tanto para elementos horizontales como verticales.

El bambú fue tratado con fuego y capa de barniz.

Fotografías propias, tomadas el 14 agosto 2020



Restaurante e ingreso principal

Hotel Ram Tzul

Purulhá, Baja Verapaz 2001

Recepción y restaurante del hotel emplazado en 2 plataformas en segmentos circulares, con techo de lámina de metal y traslucida.

Destaca la estructura portante del restaurante realizado con bambú expuesto, con protección del lado externo con repello, la estructura del techo consiste en cerchas triangulares independientes para cada agua del techo. Se empleo la estería como acabado en paredes y cielos.



Fotografías propias, tomadas el 09 enero 2021

Salón de actividades

Centro educativo del Bambú

Cuyuta, Masagua, Escuintla 2019

Salón de usos múltiples de planta circular con un apoyo principal al centro y 16 apoyos secundarios en el perímetro, por el área que cubre es considerada la mayor estructura en bambú del país, ubicado en la finca del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas – ICTA.

Destaca la estructura por sus dimensiones alrededor de 14 metros de radio y 10 metros de altura en la cumbre, lo que permite desarrollar una amplia variedad de actividades como reuniones, cursos, talleres y conferencias, la pendiente del techo se adapta a las condiciones climáticas del lugar. Se empleó la estería como acabado en el cielo de la estructura.

El bambú fue tratado para prolongar la vida útil.

Fotografías propias, tomadas el 19 enero 2021



Pérgola “Paseo Taiwán”

Facultad de Arquitectura

Guatemala, Guatemala 2015

Estructura de geometría expresiva, resultante del proyecto-taller sobre sistema constructivo en bambú realizado por catedráticos y estudiantes de la facultad en colaboración con la Misión Técnica de Taiwán en Guatemala, para promocionar el uso del material.

Destaca la geometría variable de cada marco principal de la estructura utilizando bambú, lo que permite la generación de una envolvente volumétrica de gran plasticidad, así como juegos de luces y sombras que varían conforme el recorrido del sol durante el día.

El bambú fue trabajado con creatividad logrando resultados fuera de lo convencional, logrando generar sensaciones en los peatones.



Fotografías propias, tomadas el 15 enero 2021

Restaurante El Gran Bambú

Parque Recreativo Xejuyup

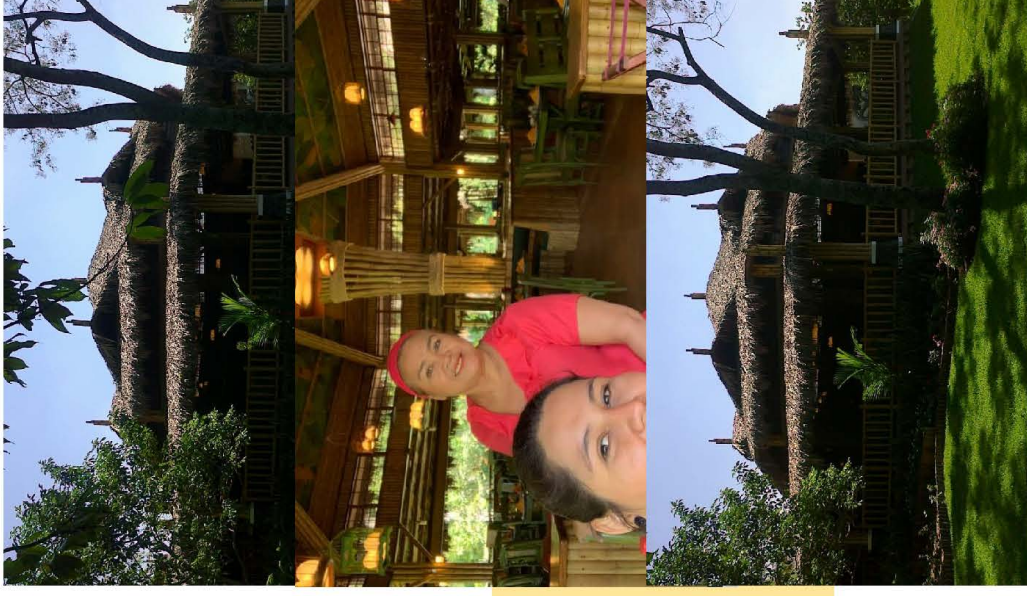
San Martín Zapotitlán, Retalhuleu
2019

Restaurante con capacidad para 370 comensales, uso de materiales locales como bambú en techo y paredes.

Destaca el uso de bambú para desarrollar el apoyo central conformado por varios culmus, así como para las vigas del techo inclinado.

Fotografía Aldo Benjamin Martínez Gramajo, Atalía Lima, publicadas en grupo público de Facebook Xejuyup <https://www.facebook.com/pages/Xejuyup/327712260581948>

Fotografías exteriores de restaurante Daniel Mérida.



Puentes peatonales

Centro educativo del Bambú

Cuyuta, Masagua, Escuintla 2019

Puentes peatonales que sirven de comunicación para librar dos riachuelos en la finca del centro educativo del bambú, ubicado en la finca del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas – ICTA.

Destaca la longitud de los puentes peatonales entre apoyos siendo de 6 a 7 metros, los cuales están simplemente apoyados en los extremos, formando una tarima de culmos dispuestos en sentido longitudinal y transversal unidos entre si con un alambre de amarre.



Fotografías propias, tomadas el 19 enero 2021

Los anteriores proyectos nacionales ejemplifican el interés en desarrollar edificios y elementos estructurales utilizando el bambú como material principal. De los casos presentados destacan los realizados por la Misión Técnica China-Taiwán, para el Centro de Estudio e Industrialización del Bambú. De acuerdo a las palabras del Embajador de la República de China (Taiwán) Señor John Lai:

“El proyecto mediante el cual se implementará el Centro de Transformación e Investigación de Bambú, con la finalidad de disponer tecnología a los interesados en conocer metodologías para el tratamiento, transformación y laminado de bambú. En el Centro de Transformación e Investigación de Bambú se capacitará en métodos de tratamiento y proceso industrial del bambú, para la elaboración de productos innovadores de diseñadores y artesanos que utilizan esta materia, logrando productos de calidad para el mercado nacional e internacional.” (Embajada de la República de China (Taiwán) en Guatemala 2019)

El Fondo de Cooperación y Desarrollo Internacional de Taiwán (ICDF por sus siglas en inglés) por medio del departamento de cooperación técnica ha estado presente en el Guatemala por más de tres décadas en las cuales ha implementado diferentes proyectos, entre ellos:

- *En la primera década impulsa la importación de especies de bambú, implementación de programas de capacitación construcción en bambú, así como la fabricación de muebles y artesanías en bambú dirigidos al pueblo guatemalteco.* (MAGA; Misión Técnica de Taiwán en Guatemala 2019)
- *En la segunda década impulsa la construcción del Centro Educativo del bambú, fortaleciendo el cultivo del bambú y su uso.* (MAGA; Misión Técnica de Taiwán en Guatemala 2019)

En cooperación con el ICTA, destaca la plantación ubicada en Cuyuta, Masagua, Escuintla en el kilómetro 83.5 de la carretera antigua al Puerto de San José. A parte de ser una plantación de bambú, es un ecoparque recreativo, y en ella se encuentra el Centro Educativo del Bambú con varias estructuras realizadas en Bambú en cooperación con la Misión Técnica China-Taiwán.

- *En la tercera década impulsa programas enfocados en el aumento del valor de la industria del bambú, focalizándose en las aldeas remotas vulnerables a los efectos del cambio climático, impulsando el cultivo del bambú.*

En cooperación con la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) y municipalidades de las zonas implementa programas de enseñanza dirigido a agricultores locales para desarrollar el uso del bambú y reducir la tala de manglares cuidando así el medio ambiente. (MAGA; Misión Técnica de Taiwán en Guatemala 2019)

Con relación a la cooperación técnica entre la República de China (Taiwán) y la República de Guatemala destaca la reconstrucción del Tortugario Hawaii, ubicado en la aldea Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa. El proyecto fue realizado en *conjunto con la ONG ARCAS, el Proyecto Industrialización del Bambú de Taiwán, en Guatemala, la Misión de Taiwán y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación –MAGA-*. (Embajada de la República de China (Taiwan) en Guatemala 2019)

En 2014 Taiwán ICDF, inicio el proyecto de industrialización del bambú en Guatemala, con una duración de 5 años, ejecutado conjuntamente con el MAGA, durante la ejecución del proyecto Taiwán ICDF brinda apoyo técnico y asesoría a la industria del bambú desde las perspectivas del sector público, privado y académico, logrando cumplir con los objetivos del proyecto.

El centro de transformación e investigación ubicado en Villa Nueva, busca introducir tecnologías avanzadas para aumentar la producción estandarizada de maderas de bambú.

Dentro de las colaboraciones con el sector académico del país destacan las siguientes:

- *El Instituto de Investigación y Estudios Superiores en Arquitectura y Diseño (INDIS) de la Universidad Rafael Landívar.*
- *La Facultad de Arquitectura de la Universidad de San Carlos de Guatemala.* (MAGA; Misión Técnica de Taiwán en Guatemala 2019)

También ha apoyado a las empresa o fábricas en el diseño y desarrollo de productos innovadores, atrayendo estudiantes interesados en generar inversión en la industria. (MAGA; Misión Técnica de Taiwán en Guatemala 2019)

Detalles constructivos

Tecnología vernácula y tecnificación de procesos

Uniones

“Lo más importante en la construcción con bambú es la formación de las uniones que transfieren fuerzas de un elemento al otro.” (Minke 2010) Esta afirmación se debe a la característica física que tienen los culmos de bambú, al ser redondos y huecos en el interior, con nudos o tabiques a cada cierta distancia dependiendo de la especie, los segmentos entre nudos presentan únicamente fibras longitudinales, lo que hace que no se puedan clavar o atornillar como la madera, ya que los culmos se rajarían en el sentido longitudinal siguiendo las fibras. Para evitar la aparición de las rajaduras se deben perforar los culmos para colocar pernos, anudar con sogas o alambre galvanizado para lograr las uniones.

El autor Gernot Minke en su libro *Manual de construcción con bambú*, ofrece algunas recomendaciones sobre uniones, las cuales se transcriben a continuación:

1. Los elementos metálicos usados en uniones que estarán a la intemperie deben ser anticorrosivos o deben tener un tratamiento anticorrosivo. Si las cañas están sometidas a cargas que puedan producir un aplastamiento, se hace necesario rellenar con una mezcla de mortero de cemento los entrenudos adyacentes a la unión y por donde pasen pernos, preferiblemente con un aditivo plastificante que mejora la fluidez de la mezcla.

2. El espaciamiento entre los pernos no debe ser inferior a 150 mm ni superior a 250 mm en uniones sometidas a tracción e inferior a 100 mm en uniones sometidas a compresión” (Minke 2010)

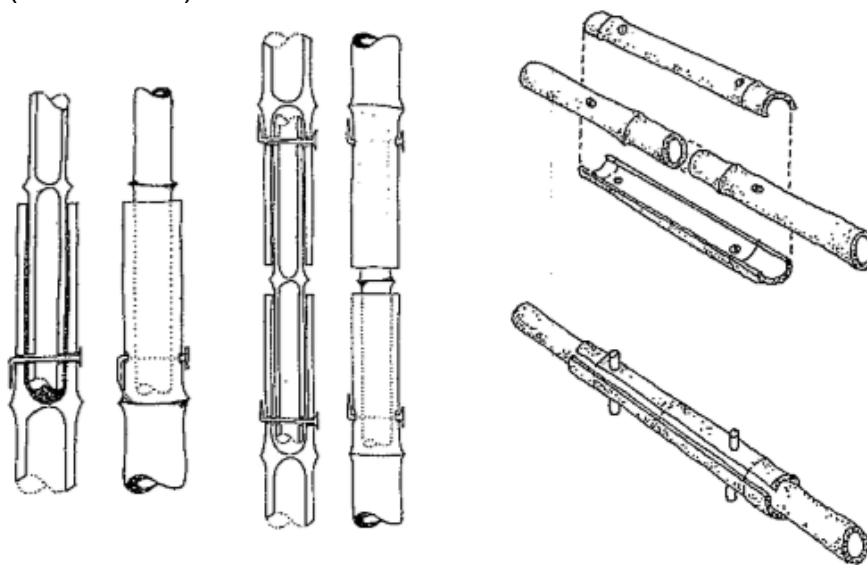


Imagen 72: Uniones entre culmos de bambú para añadir longitud al elemento.

Fuente: Minke (2010)

3. Tradicionalmente para fijar las uniones se usan “lianas” o lazos de fibras naturales o de cuero humedecido (al secarse se aseguran más) ..., más comúnmente, se usa alambre galvanizado”.
4. Para la unión también se pueden usar elementos de madera”.
5. El corte más común para estas conexiones se llama “boca de pescado” y es perpendicular. Si el corte está inclinado, se llama “pico de flauta” (Minke 2010).

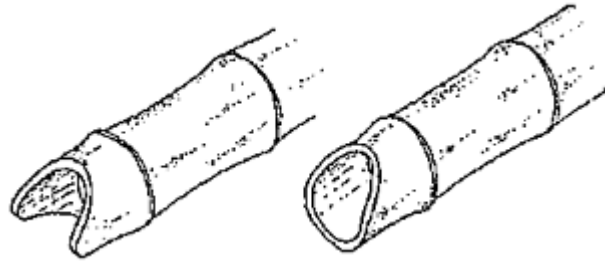


Imagen 73: Tipos de cortes “Boca de pescado” (izquierda), “Pico de flauta” (derecha).
Fuente: Minke (2010).

6. Una solución más adecuada y sostenible es el uso de pasadores de madera dura de árbol o palma” (Minke 2010).

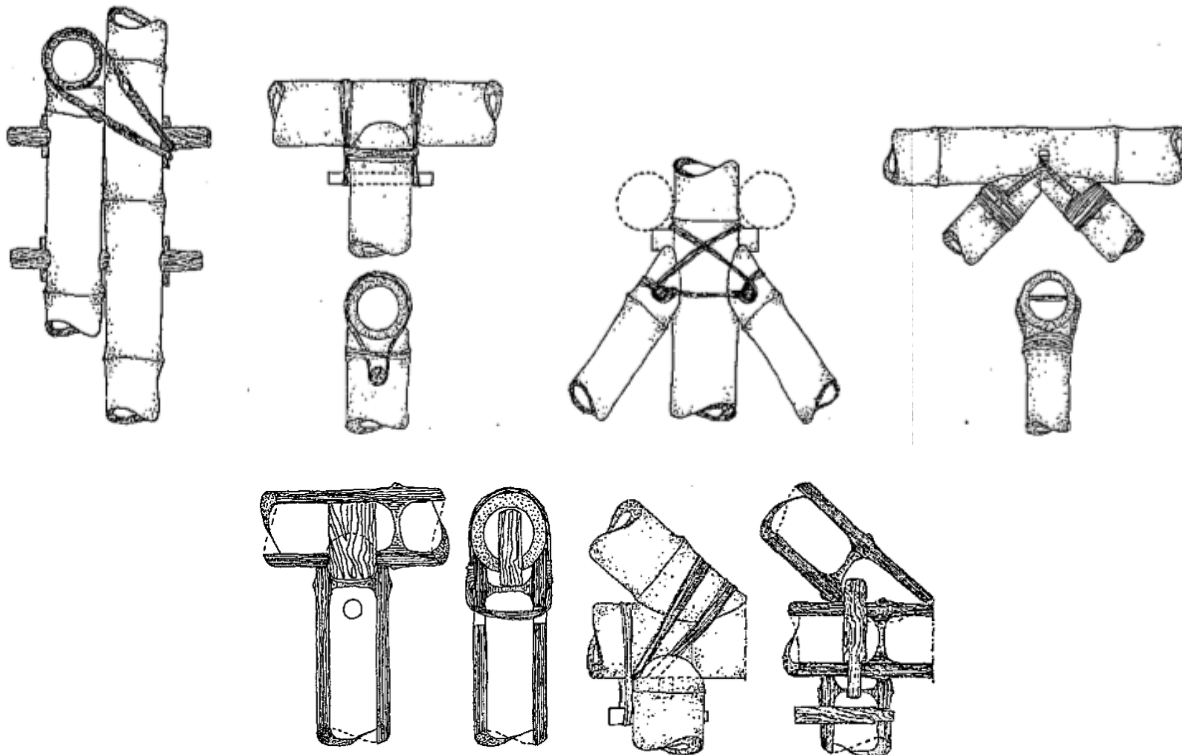


Imagen 74: Uniones entre culmos de bambú con alambre galvanizado o con lazo natural y empleo de pasadores de madera dura.
Fuente: Minke (2010).

7. Cuando se rellena un entrenudo con mortero de concreto, hay que tener en cuenta que el concreto se contrae durante el curado quedando un espacio entre el tallo y éste; ... Se puede reducir la contracción usando una mezcla de 1 parte de cemento por 3 o 4 partes de arena gruesa y gravilla de hasta 4 mm de diámetro, Cuando se va a perforar el tallo para hacer este procedimiento, es mejor realizar una perforación no mayor a 2,5 cm de diámetro para no debilitar la resistencia del tallo. (Minke 2010)

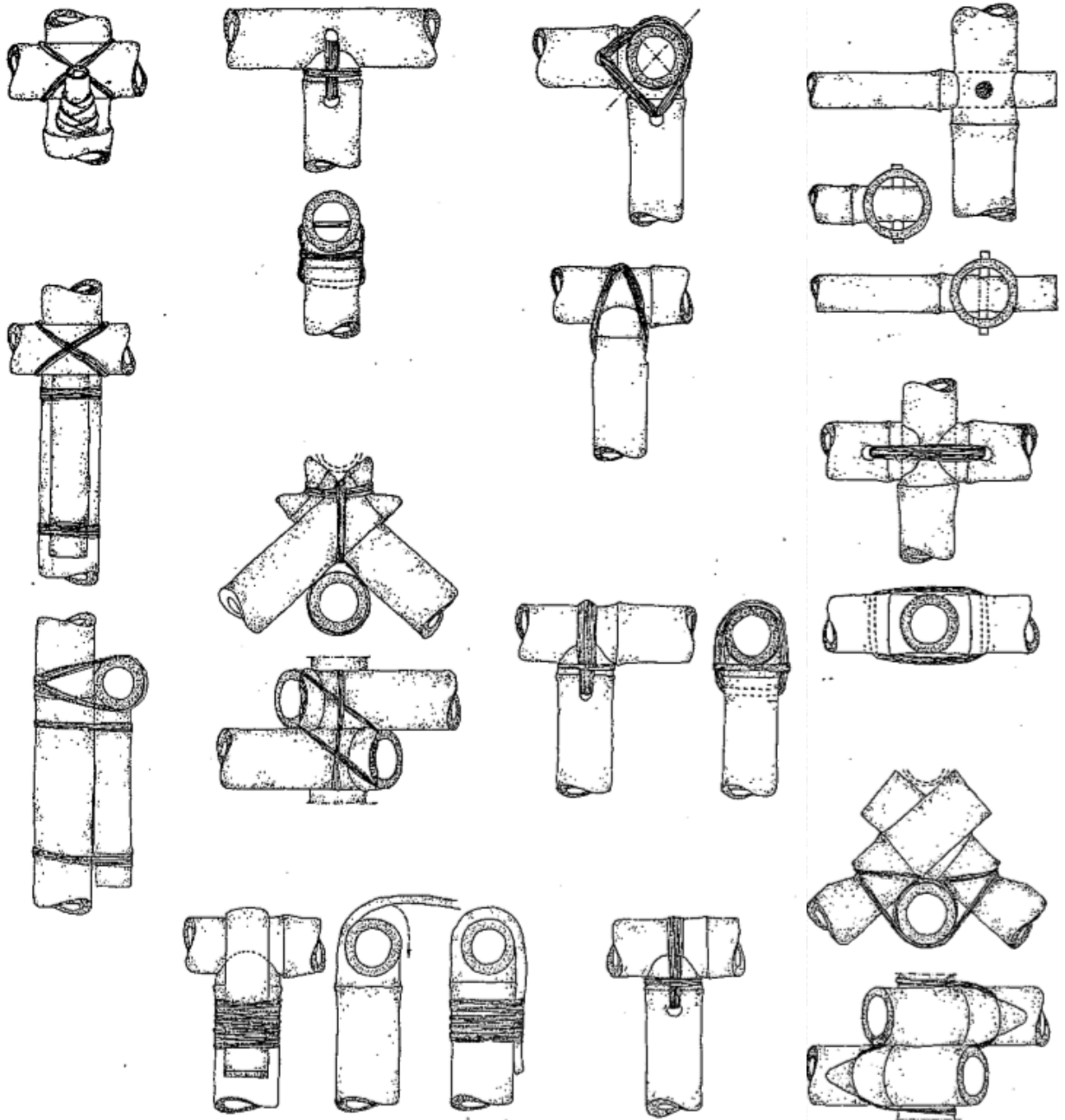


Imagen 75: Uniones entre culmos de bambú con alambre galvanizado o con lazo natural.
Fuente: Minke (2010).

“Más sintetizado es el desarrollo de conexiones con caucho, las cuales facilitan una unión sobre toda el área de contacto sin necesidad de intervenir las cañas con cortes en sus extremos”. (Minke 2010)

Columnas

“Es importante tener en cuenta que las fuerzas transferidas a la sección transversal, tanto en la cabeza del pilar como en su base, sean homogéneas”. (Minke 2010)

“Una solución frecuente para la base es rellenar la caña con mortero de cemento hasta el primer nudo para evitar que la caña se abra o se rajé”. (Minke 2010) Con la finalidad de proteger los culmos de la humedad, se instala en este, una varilla de acero fijada con concreto, para lograr una distancia entre la fundición de cimiento y la caña. Como alternativa a usar concreto para el relleno se puede realizar una mezcla de epoxi con arena y gravilla o piedrín fino.

Existen alternativas al relleno de concreto el cual puede ser laborioso. Entre las alternativas se puede mencionar la siguiente: insertar en los extremos del culmo un tubo de acero, o bien, piezas de madera dura rolada, permitiendo realizar uniones a los culmos con pasadores de madera o tornillos.

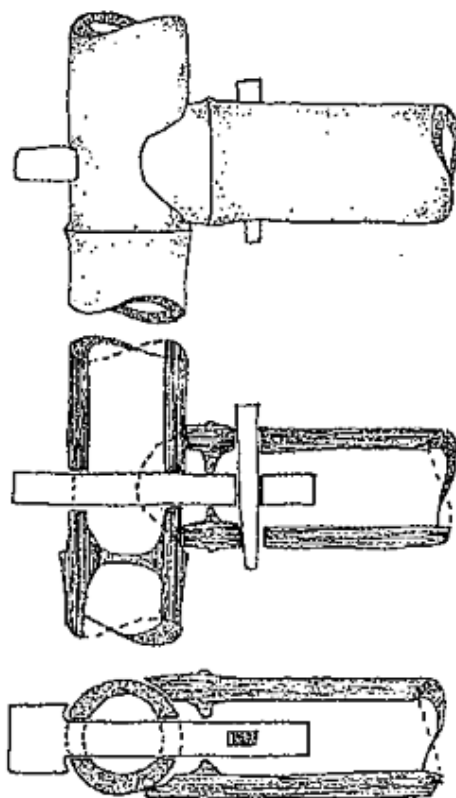


Imagen 76: Uniones articuladas entre culmos de bambú con piezas y pasadores de madera dura.
Fuente: Minke (2010).

Una alternativa simple para realizar uniones articuladas en una columna, donde no se utilicen conos o elementos especiales en metal fue realizada por Gernot Minke; en la cual los extremos de los culmos descansan en un bote reciclado con arena, esta solución permite regular la profundidad de los elementos hasta que todos transfieran las mismas fuerzas, equilibrando así la estructura. *“Para transferir fuerzas grandes se pueden unir de manera paralela varias cañas”* (Minke 2010) *“Para soportar grandes cargas se pueden usar un grupo de columnas inclinadas a manera de hiperboloide en rotación”*. (Minke 2010)

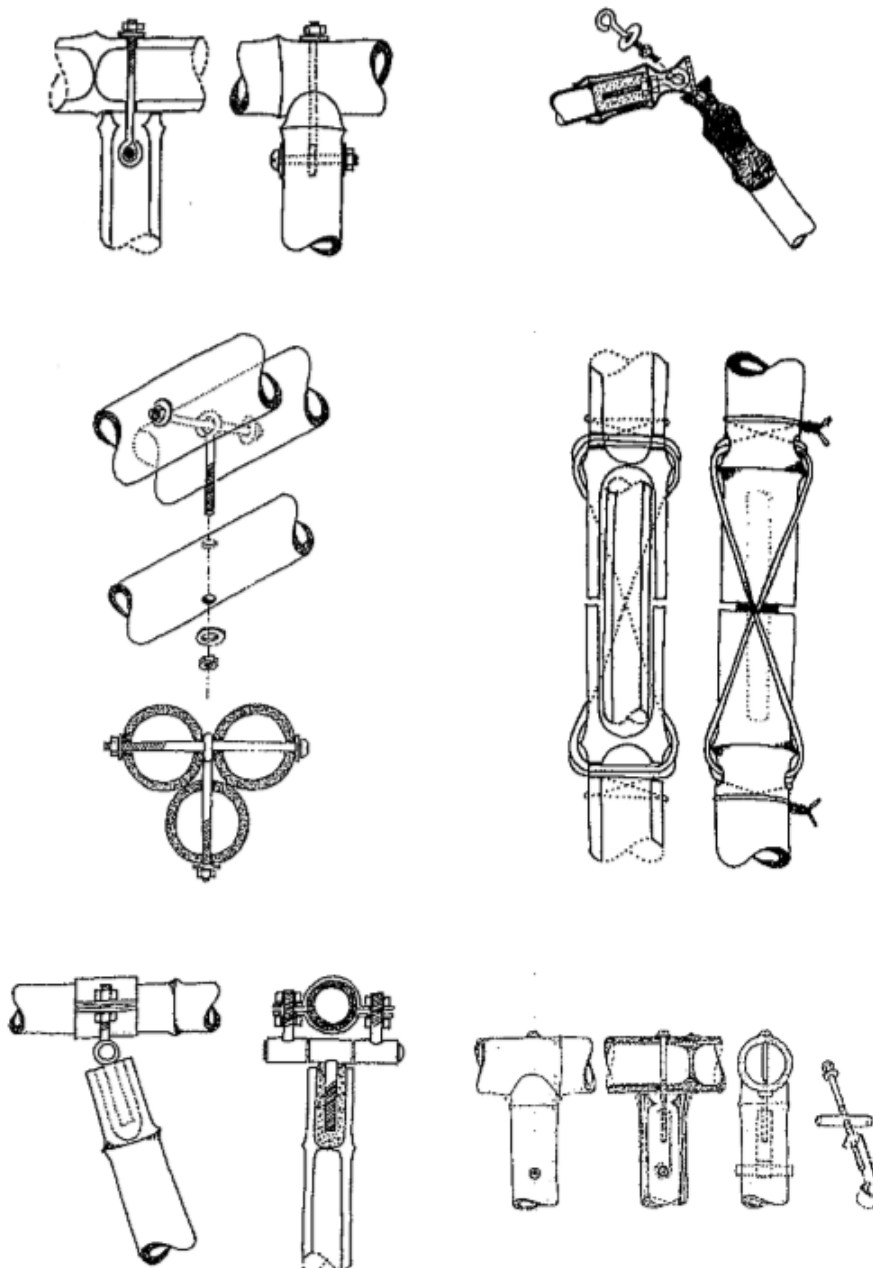


Imagen 77: Uniones articuladas entre culmos de bambú con pernos de acero.
Fuente: Minke (2010).

Vigas, cerchas y pórticos

“Utilizar una caña como viga normalmente no es adecuado ya que es débil en flexión, y su apoyo es sólo una línea y no un área si no hay un apoyo especial.” (Minke 2010). Por esta razón es recomendable usar culmos simples como vigas en tramos cortos o en cargas pequeñas. Como alternativa para aumentar la capacidad en las vigas se colocan dos o tres culmos en paralelo, conectándolos con pasadores de madera o con barras roscadas inclinadas hacia adentro.

Una opción para evitar que los culmos se abran o quiebren, es ubicar los apoyos debajo de un nudo; aunque sería mejor rellenar los extremos de los culmos con material resistente a la compresión, como el concreto. Aunque existen opciones más tecnificadas para transferir los esfuerzos en extremos, se realizan en terminación cónica empotrada en una varilla roscada, esta solución también es empleada en estructuras espaciales.

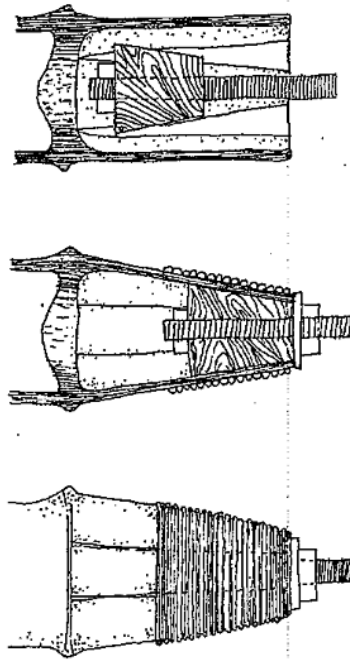


Imagen 78: Terminación cónica de culmo de bambú con carilla roscada para anclaje.

Fuente: Minke (2010).

Al pretensar las vigas es posible aumentar su resistencia a la flexión, para lograrlo, el cordón en el culmo inferior de la viga funciona como un cable de tensión, a este tipo de viga se le conoce como viga “vientre de pez”.

En el caso de requerir que la viga soporte grandes cargas es recomendable usar cerchas, para el diseño de estas se pueden usar configuraciones de armaduras Pratt, Warren, etc., algunos arquitectos y constructores en bambú como Francisco Lima y Simón Véles optan por sustituir el cordón inferior central por una varilla de acero, debido a que este solo trabaja a tracción.

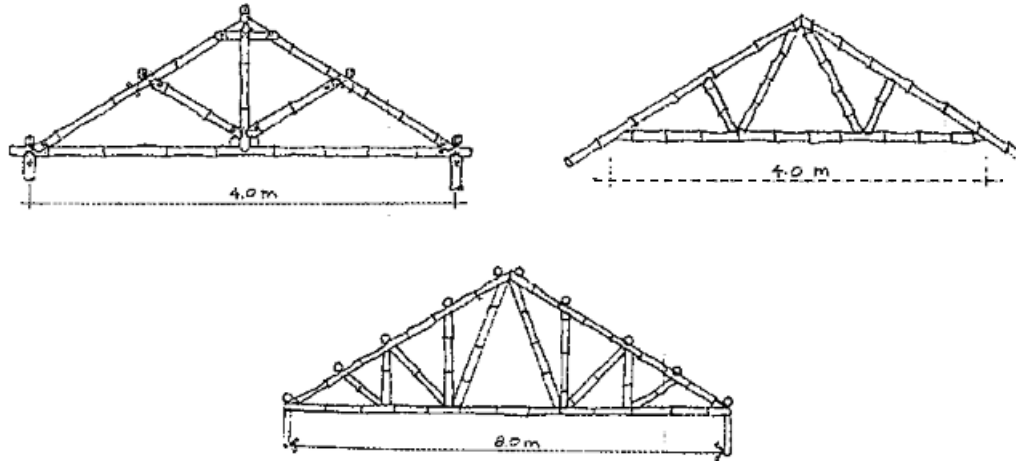


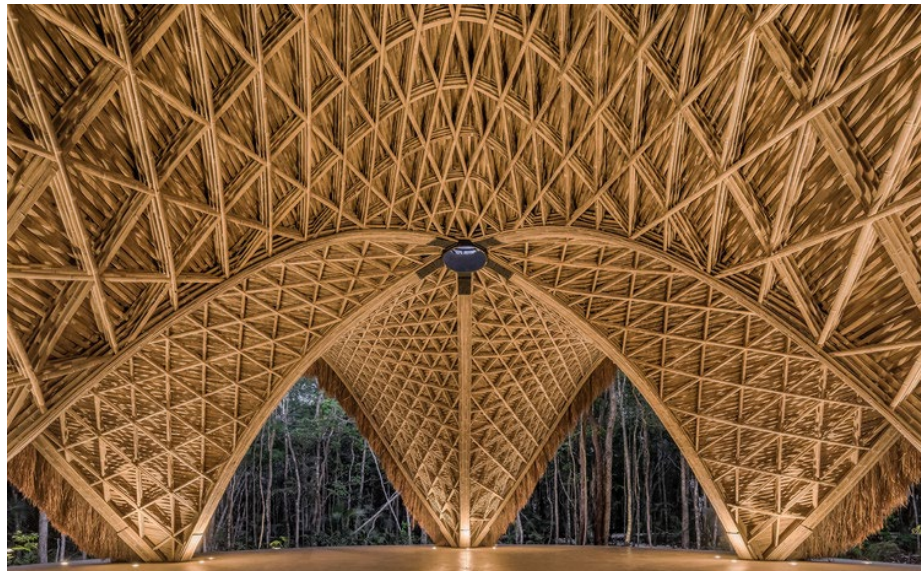
Imagen 79: Tipos de cerchas en bambú para soportar grandes cargas.

Fuente: Minke (2010)..

Arcos

“Es muy difícil curvar cañas de bambú en forma de arco. Un método sencillo consiste en utilizar tiras de cañas abierta (latas), una sobre otra, unidas con zunchos o pasadores”. (Minke 2010)

Unir fajas o tiras de bambú (latas) separadas por trozos de culmos con nudo, unidos por medio de remaches pop en los puntos de contacto, es una alternativa. En un estudio de investigación desarrollado por Gernot Minke en la Universidad de Kassel, Alemania, obtuvo resultados que demostraron soportar cargas de 50 kg hasta 500 kg sin deformarse.



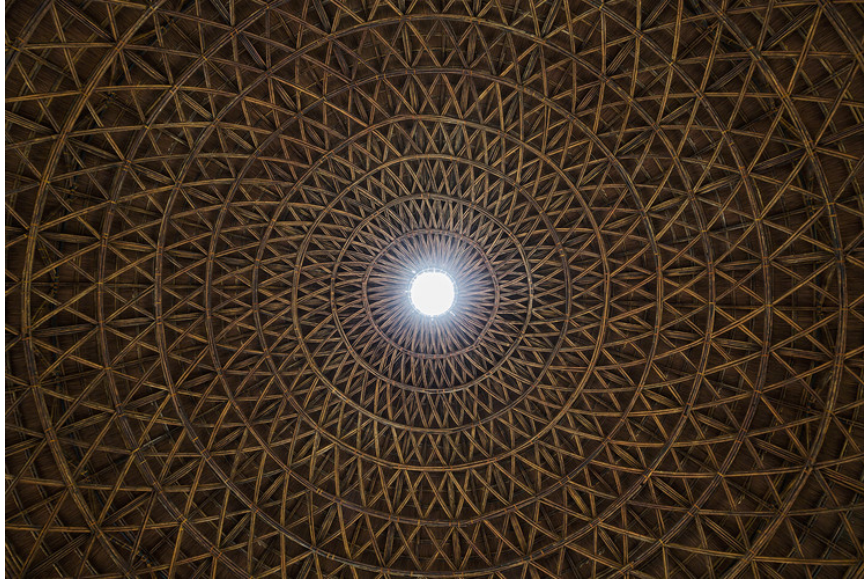
Fotografía 17: Detalle hipérbolas tejidas y arcos perimetrales con latas de bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919123/templo-luum-co-lab-design-office>

Acceso el 17 de marzo 2020.

Techos

“Una solución muy común es cubrir la luz entre tijeras o vigas con esterillas de bambú.” (Minke 2010) Cuando las luces entre apoyos son mayores se pueden colocar culmos finos de bambú uno al lado del otro.



Fotografía 18: Detalle techo tejido de cúpula con culmos de bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/779141/centro-comunitario-diamond-island-vo-trong-nghia-architects>

Acceso el 17 de marzo 2020.

Bóvedas

“Estructura dimensional en simple curvatura, como la adición de arcos, que transfiere fuerzas en compresión.” (Minke 2010)

En 1981 y 1983, en el Instituto de Construcciones Experimentales (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, se desarrollaron dos sistemas de bóvedas antisísmicas. “La primera fue construida con latas de *Guadua angustifolia* colgadas entre dos soportes a manera de catenarias. Perpendicular a éstas fueron colocadas cañas de guadua y encima otras latas; los puntos donde los elementos se cruzaban fueron fijados con remaches tipo pop. Después de esta acción la estructura fue invertida formando una bóveda estructuralmente óptima para bóvedas sin carga viva.”

“La otra estructura consiste en arcos de 4 latas de guadua en forma de una parábola. Arriba de ésta se ponen adobes en forma de U. Esta bóveda fue tensada con una lona impermeable a ambos lados, dando resistencia antisísmica.” (Minke 2010)



Fotografía 19: Detalle bóvedas tejidas con culmos de bambú.

Fuente: <https://www.archdaily.com/905690/bamboo-pavilion-zuo-studio>

Acceso el 17 de mayo 2020.

Cúpulas

“Estructura dimensional de doble curvatura en un mismo sentido, que transfiere fuerzas, predominantemente, en compresión.” (Minke 2010)

“En el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, fue construida una cúpula geodésica que cubre 20 m², pesa 200 kg y soporta un techo verde con mucha tierra que pesa en total 12 toneladas, es decir, 60 veces más que su peso propio” (Minke 2010)

Existen alternativas en la construcción de cúpulas o domos geodésicos, siendo estas: retícula construida a partir de una red de latas de bambú cubierta con malla de gallinero, la cual funciona como un encofrado para fundición de cúpula de barro o concreto. Otra alternativa es construir una cobertura con un tejido de latas de bambú.



Fotografía 20: Detalle cúpula de bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/874973/nymbu-modulo-observatorio-de-aves-en-cusco>

Acceso el 18 de mayo 2020.

Paraboloides hiperbólicos

“Es una forma con doble curvatura en diferentes sentidos. En éste, todos los cortes verticales son parábolas y todos los cortes horizontales son hipérbolas.” (Minke 2010)

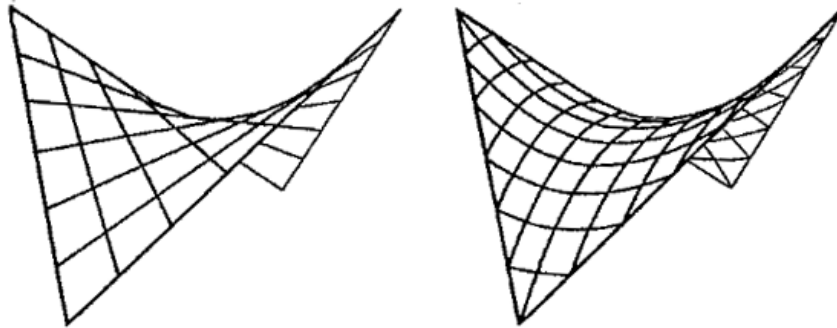


Imagen 80: Tipos de paraboloides hiperbólicos generados con líneas rectas (izquierda) y generado con parábolas (derecha).

Fuente: Minke (2010)..

“Usar elementos constructivos en posición recta es más fácil, pero estructuralmente no es óptimo porque los elementos y los bordes reciben fuerzas en flexión.” (Minke 2010). Los elementos curvados en forma de parábolas resultan ser más efectivos estructuralmente, puesto que, las parábolas hacia arriba (como un cable) trabajan con cargas a tracción y las parábolas hacia abajo (como un arco) trabajan con cargas a compresión. *“Cuando éstas se encuentran en el borde dan una componente axial al elemento recto de borde; es decir, no hay flexión en borde”.* (Minke 2010) Lo que permite que esta solución requiera menor material constructivo en comparación con la opción con elementos rectos.



Fotografía 21: Detalle concha formada por hipérbolas con culmos dobles de bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/912110/pabellon-de-bambu-vinata-vtn-architects>

Acceso el 17 de marzo 2020.

A continuación, se presentan las diferentes alternativas de uniones realizadas comúnmente en la construcción con bambú, tanto desde el conocimiento vernáculo a través de la construcción empírica, como desde la tecnificación de estos procesos constructivos:

Uniones amarradas

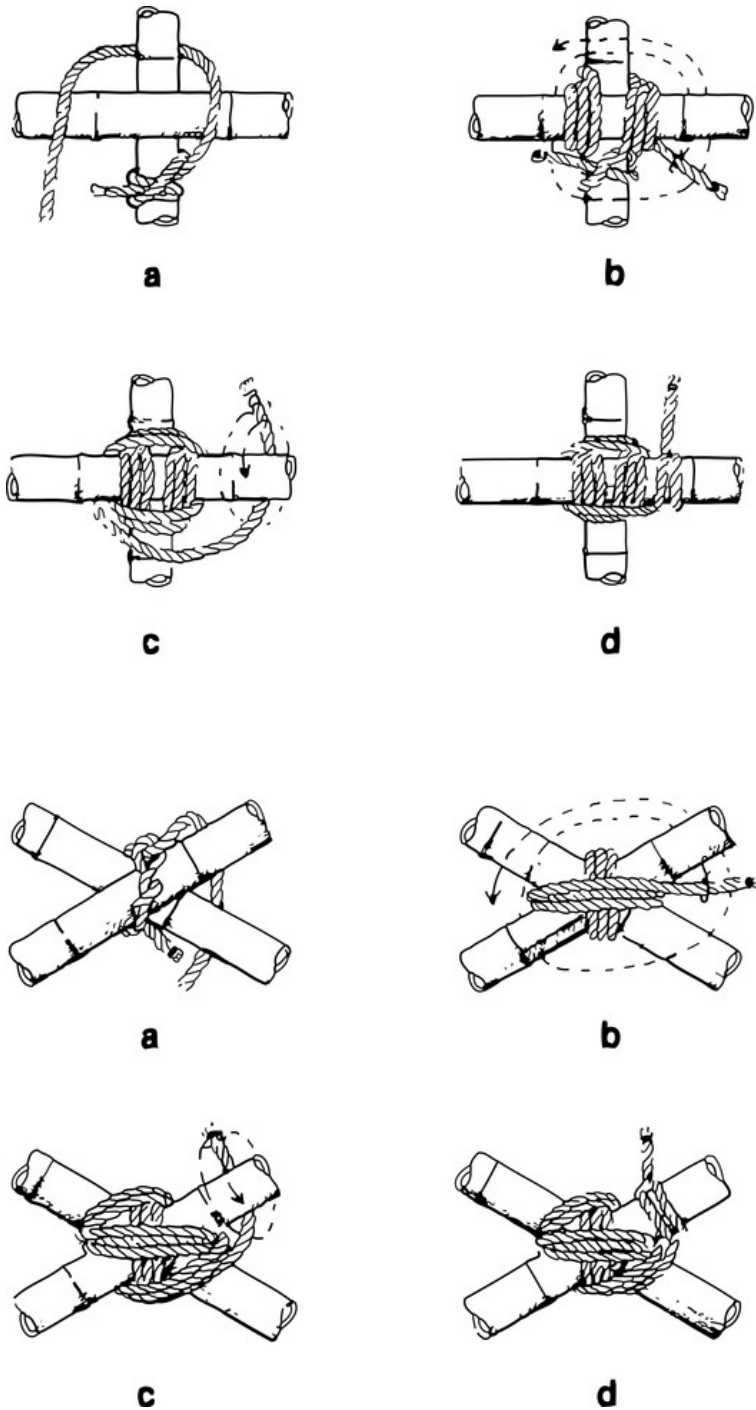


Imagen 81: Amarre cuadrado y amarre de espas.

Fuente: Hidalgo (1981).

Uniones con pasantes

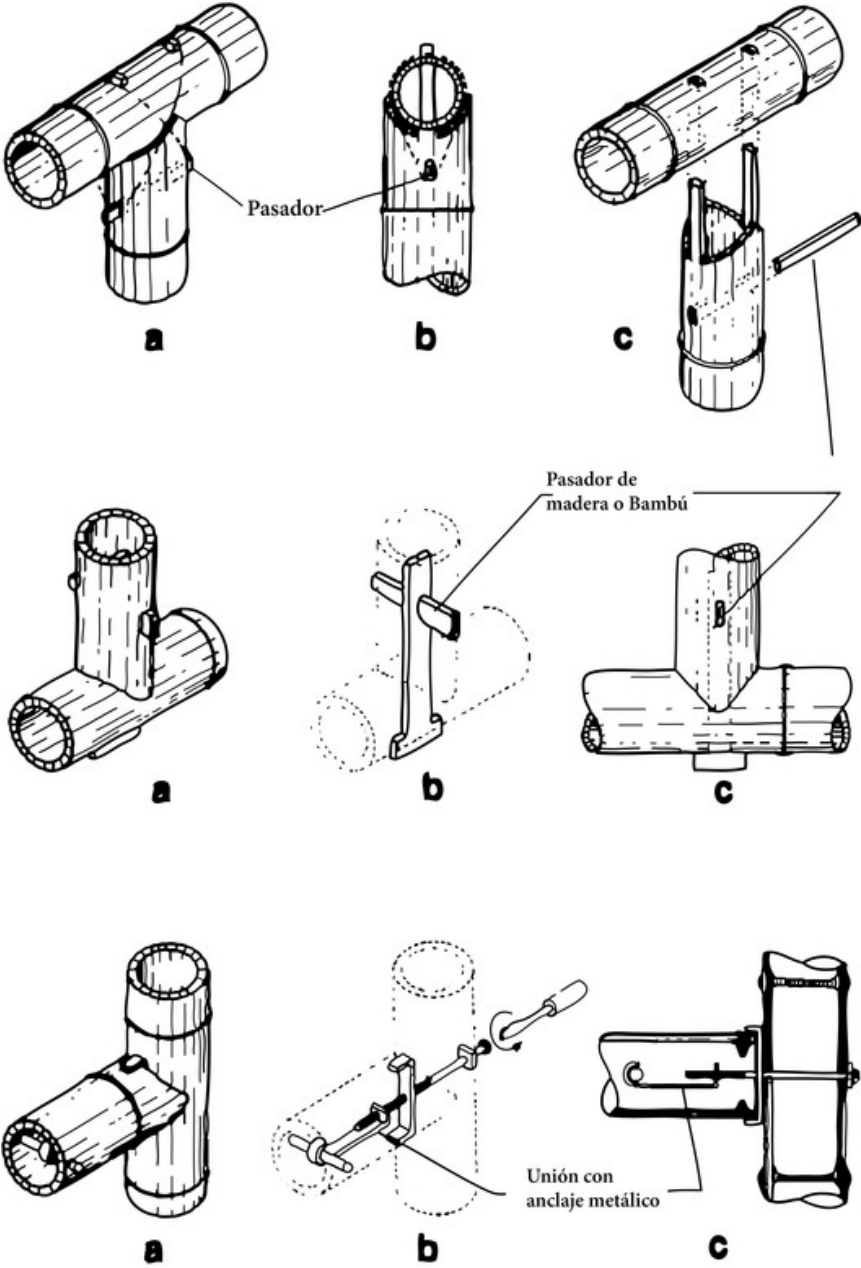


Imagen 82: Unión con clavijas, anclaje de madera o anclaje metálico.
 Fuente: Hidalgo (1981).

Uniones de encaje

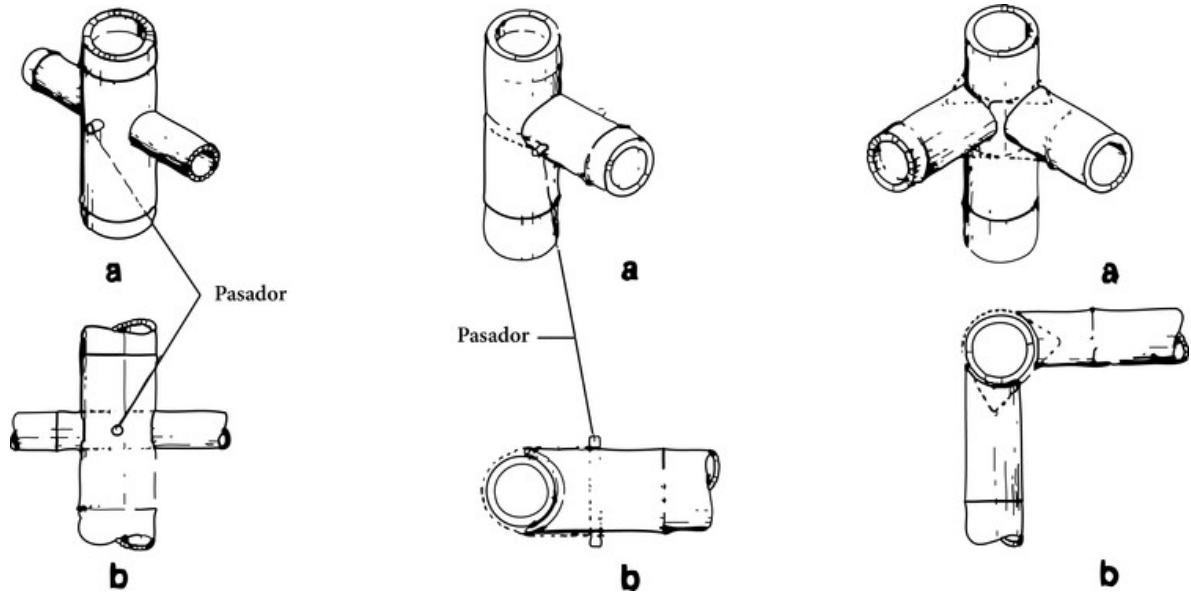


Imagen 83: Unión en cruz con pasador, unión lateral con pasador y clavijas y unión de esquina.
Fuente: Hidalgo (1981).

Empalmes de piezas horizontales

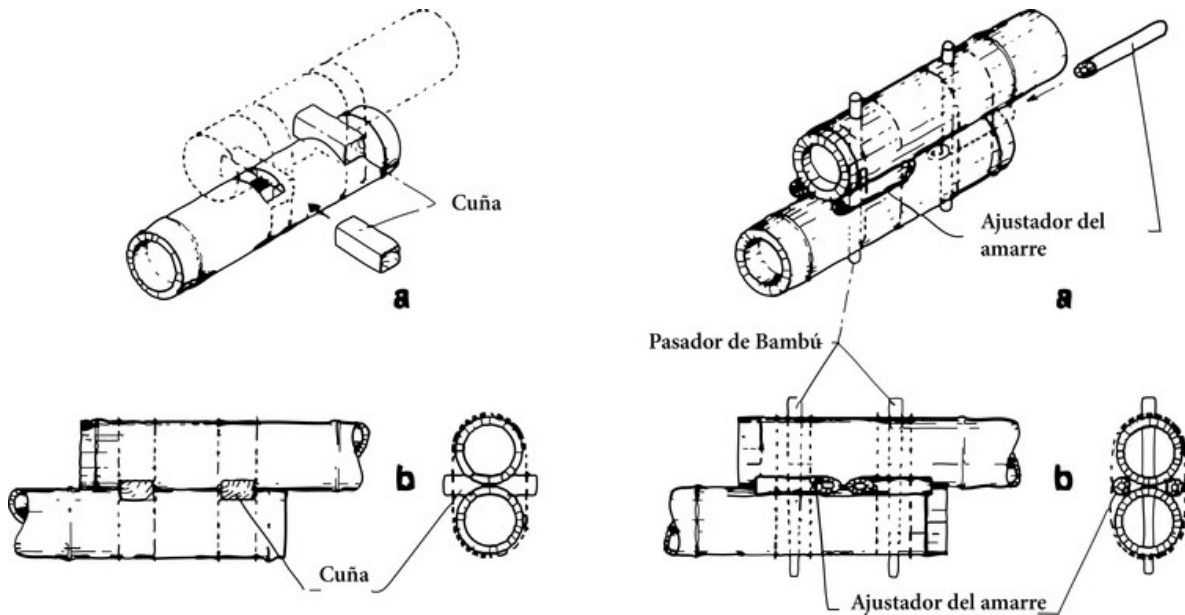


Imagen 84: Unión con doble cuña de madera y unión con pasadores y ajustadores del amarre.
Fuente: Hidalgo (1981).

Soportes de vigas horizontales

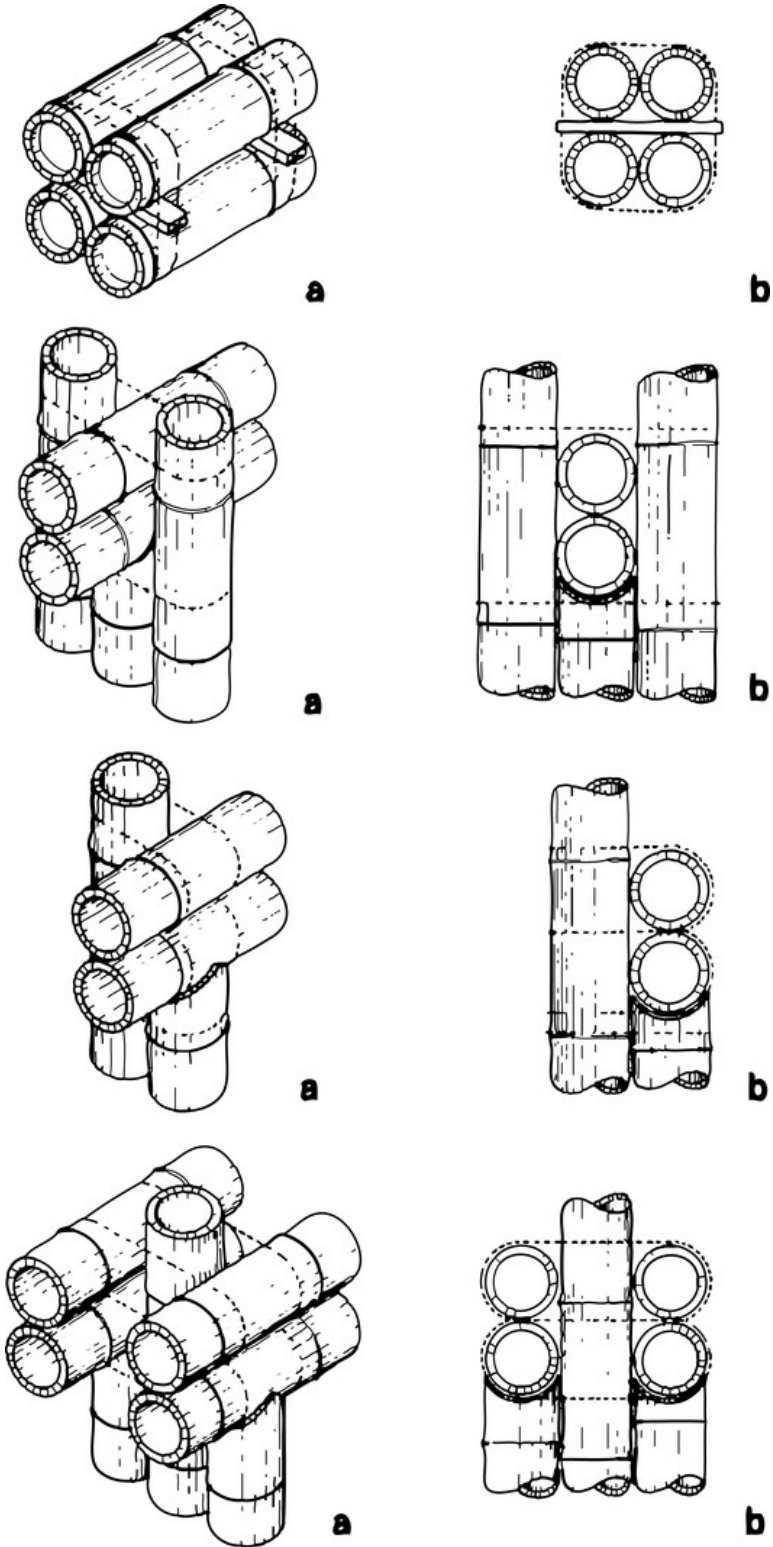


Imagen 85: Viga de cuatro elementos, doble viga Central, doble viga lateral, vigas dobles laterales.
 Fuente: Hidalgo (1981).

Reforzamiento de concreto con bambú

“La duración de vida de las fibras de bambú en un mortero de cemento es muy limitada porque la alcalinidad del cemento destruye la pectina de la celulosa. A pesar de esto las fibras se usaron exitosamente” (Minke 2010) en otros trabajos de investigación y experimentación en Inglaterra, Alemania o Río de Janeiro.

Al ser un material orgánico, y existir la alta posibilidad de que la alcalinidad del cemento acelere el proceso degenerativo del bambú no se recomienda el uso del bambú como sustituto del acero, debido a que transcurrido un tiempo, únicamente el concreto sería el material que trabajaría a compresión en el elemento estructural, elevando el riesgo de falla por flexión.

DETALLES CONSTRUCTIVOS DE PROYECTOS ANALIZADOS EN CASOS DE ESTUDIO

De los proyectos presentados en los casos de estudio, a continuación, se presentan las soluciones y detalles constructivos aplicados para la ejecución.

Templo luum desarrollado por CO-LAB Design Office

Destaca la utilización de fajas de bambú conocidas comúnmente como “latas” entretejidas unidas por varillas roscadas, para formar la superficie portante de la palapa, así como anclajes de acero para la cimentación y un anillo central.



Fotografía 22: Detalle estructura portante.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919123/templo-luum-co-lab-design-office>
Acceso el 17 de marzo 2020.



Fotografía 23: Detalle anclaje a cimentación.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919123/templo-luum-co-lab-design-office>
Acceso el 17 de marzo 2020.



Fotografía 24: Detalle de anclaje a anillo central.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919123/templo-luum-co-lab-design-office>
Acceso el 17 de marzo 2020



Fotografía 25: Vista general del proyecto.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/919123/templo-luum-co-lab-design-office>
Acceso el 17 de marzo 2020.

Pabellón de deportes de bambú para la Escuela Internacional Panyaden desarrollado por Chiangmai Life Construction

Destaca el desarrollo de marcos estructurales en forma de arcos, los cuales permiten grandes luces entre apoyos, para desarrollar una superficie entretejida para el cerramiento del proyecto, empleando para los anclajes del marco varillas de acero roscada y lazo natural.



Fotografía 26: Izado de marcos estructurales con grúa.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/878837/pabellon-de-deportes-de-bambu-para-la-escuela-internacional-panyaden-chiangmai-life-construction>

Acceso el 17 de marzo 2020.



Fotografía 27: Vista general de la estructura de cubierta.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/878837/pabellon-de-deportes-de-bambu-para-la-escuela-internacional-panyaden-chiangmai-life-construction>

Acceso el 17 de marzo 2020.



Fotografía 28: Detalle anclajes y uniones entre culmos.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/878837/pabellon-de-deportes-de-bambu-para-la-escuela-internacional-panyaden-chiangmai-life-construction>

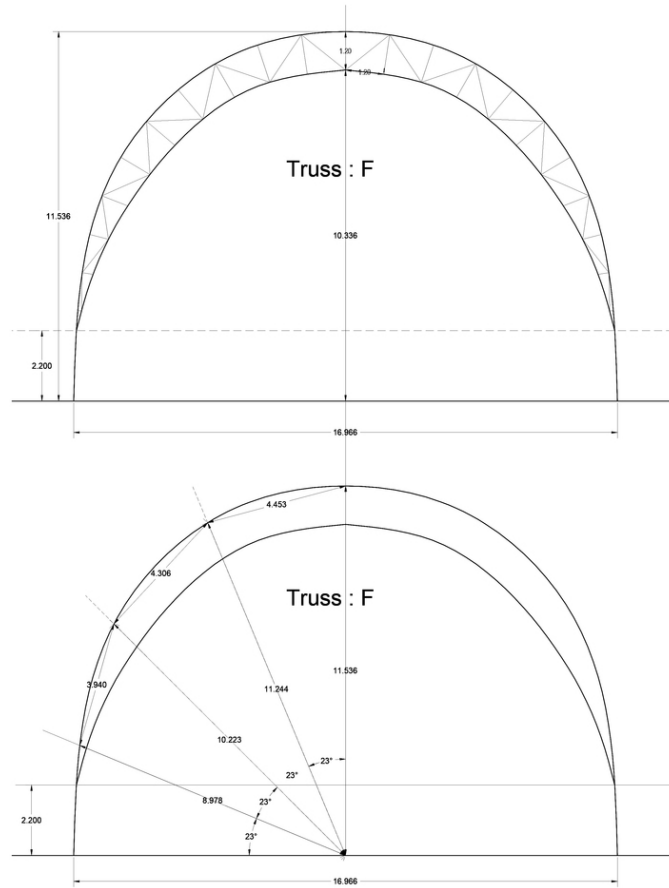
Acceso el 17 de marzo 2020



Fotografía 29: Detalle entramado superficie cubierta.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/878837/pabellon-de-deportes-de-bambu-para-la-escuela-internacional-panyaden-chiangmai-life-construction>

Acceso el 17 de marzo 2020.



Fotografía 30: Trazo de marcos estructurales en bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/878837/pabellon-de-deportes-de-bambu-para-la-escuela-internacional-panyaden-chiangmai-life-construction>

Acceso el 17 de marzo 2020.

La Ceiba desarrollado por Lucila Aguilar Arquitectos

Destaca el desarrollo de parábolas hiperbólicas como estructura de techos, las cuales se realizaron con una retícula doble de culmos de bambú, Para los anclajes de los culmos se emplearon varillas de acero roscada.



Fotografía 31: Izado de cerchas curvas de bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>
Acceso el 17 de abril 2020.



Fotografía 32: Vista interior cerchas curvas en bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>
Acceso el 17 de abril 2020.



Fotografía 33: Apoyo central paraboloide hiperbólico.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>
Acceso el 17 de abril 2020.



Fotografía 34: Izado paraboloid hiperbólico en bambú.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>

Acceso el 17 de abril 2020.



Fotografía 35: Vista interior módulo de duchas.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>

Acceso el 17 de abril 2020



Fotografía 36: Paraboloid con apoyos perimetrales.

Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/903308/la-ceiba-lucila-aguilar-arquitectos>

Acceso el 17 de abril 2020.

RECOMENDACIONES PARA USAR EL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES:

El carpintero alemán Jörg Stamm plantea siete recomendaciones para el uso del bambú en la construcción de puentes peatonales y vehiculares, dentro de las recomendaciones destacan las siguientes:

1. Sobre la viga; *“No solo soporta en su dirección axial el peso de aproximadamente 700 kg/cm² y a tensión unas 2 toneladas.”* (J. Stamm 2009)

Sobre la viga curvada: *“Arcos son sistemas muy poderosos para cargas bien distribuidas. Su principal problema son las cargas puntuales, generando deformaciones peligrosas. Por esto se puede crear paquetes de bambúes, aprovechando su curvatura natural, conectándolos mediante pernos y chazos.”* (J. Stamm 2009)



Fotografía 37: Paquetes de bambú para contrarrestar deformaciones por cargas puntuales.

Fuente: http://bambusc.org.br/wp-content/gallery/WBC2009/WBCVIII-Vol_10.pdf

Acceso el 10 de agosto 2021

2. Sobre el arco; *“La altura estática de una cercha puede ser del 5% de la luz en metal y del 10% de la luz en madera o bambú.”*

“La cercha plana es una buena opción para rigidizar el arco mediante tensores y compresores. Pero esto requiere adicionalmente una estabilización lateral con crucetas en la parte del techo y una placa de concreto reforzado en el piso.” (J. Stamm 2009)

El uso de culmos con la curvatura natural, facilita la fabricación y construcción de estructuras curvas.

3. Sobre el puente colgante; *“La capa del tercio externo del bambú tiene excelentes propiedades a la tensión y también es suficientemente tolerante a la tensión, por lo cual se usaba mucho para crear cables.”* (J. Stamm 2009)
4. Sobre el Puente atirantado; *“Los puentes atirantados distribuyen la carga de la plataforma con varias tirantas similar al “cantiléver”. Esto facilita el camino y permite usar la capacidad natural de un culmo entero.”* (J. Stamm 2009)
5. Sobre las superficies activas; *“Placas rígidas o superficies activas son muy pesadas pero muy estables, tanto a compresión como a tensión.”* (J. Stamm 2009)

El concepto de superficie activa lo aplicó Jorg Stamm en el puente de Bali al usar capas “layers”. En la primera utilizó bambúes amarillos que cumplen la función de tirantas que estabilizan el puente; para la segunda capa empleó bambúes negros colocándolos en sentido opuestos a la primera capa, finalmente para conformar la tercera capa usó miles de listones envueltos en paja logrando crear un conjunto parecido a una placa que trabaja como una superficie de forma activa.



Fotografía 38: Capas de bambú para superficie activa.

Fuente:

https://www.academia.edu/6885668/Siete_Conceptos_para_hacer_un_Puente_en_Bamb%C3%BA

Acceso el 10 de junio 2021.

6. Sobre las cerchas planas; *“La ingeniería civil se desarrolló en el siglo 18 y 19, cuando ya no había troncos gruesos, así que el ingenio del hombre necesitaba solucionar los problemas de cubiertas y puentes con palos de secciones similares*

a nuestra guadua... los bambúes del mundo tropical son de dimensiones parecidas, fuertes, pero más livianas, ideal para estructuras livianas!” (J. Stamm 2009)

Debido a la predilección por usar metal, hace referir el uso de la viga tipo “Warren”, sin embargo, para el uso de maderas y bambú es mejor trabajar con cerchas tipo Rey o tipo “Howe” por la dificultad en trabajar uniones a tensión y la facilidad en las uniones a comprensión.

Cercha Rey: debido a que el “bambú se raja fácil porque solo cuenta con un entretejido mínimo en la zona en la zona nodal, por esto requiere refuerzo con acero e inyecciones de cemento en los canutos” (J. Stamm 2009)

Cercha Howe: “la contraflecha de un puente puede ser alrededor de un 5% del largo a cubrir y coincide con la curvatura natural promedio del bambú. Algunos arcos requieren un galibo mayor, pero es casi imposible pasar de un 10% sin medidas artificiales de doblamiento” (J. Stamm 2009) para curvar el culmo.

7. **Sobre la estructura espacial;** *“Sus elementos trabajan tanto a tracción como a comprensión, cargas solo deben inducirse a través de los nudos. Las cerchas ideales se basan en los cuerpos platónicos como el tetraedro o la pirámide y pueden necesitar varios niveles para generar estructuras definidas.*

El tetraedro con 4 tubos de bambú requiere una unión confiable, que concentra el esfuerzo desde la corteza del tubo hacia un solo punto axial.

En cuanto a la eficiencia en cantidad de bambú versus capacidad portante se estima que este sistema es el más eficiente, aunque el más tecnificado.

El mantenimiento o el cambio de un elemento son relativamente fáciles, ya que cada tubo cuenta con su propia rosca de ajuste. El costo del sistema es por encima del padrino metálico, ya que procesar recursos naturales requiere más cuidado y conocimiento que con materiales de procesos industriales como tubos de acero.” (J. Stamm 2009)

COSTO DE CONSTRUCCIÓN CON BAMBÚ EN GUATEMALA

Respecto a los costos de construcción con bambú, estos pueden variar según el criterio del profesional o constructor a cargo del proyecto. Por lo anterior se presenta el costo estimado obtenido de diferentes sistemas constructivos, para efectos comparativos:

TABLA DE PRECIOS DE CONSTRUCCIÓN SEGÚN SISTEMA

Tipo	Descripción tipo de construcción	Área de proyecto	Costo de materiales por m ²	Costo de mano de obra por m ²	Costo total por m ²
1	Módulo de servicios sanitarios en mampostería reforzada bloques de concreto con zapata + cimiento corrido y cubierta estructura metálica con lámina.	23.83 m ²	Q. 3,445.19	Q. 1,378.08	Q 4,823.27
2	Guardianía con sistema BloCon visto con cubierta estructura metálica con lámina.	46.43 m ²	Q. 1,801.85	Q. 720.74	Q 2,522.59
3	Módulo de servicios sanitarios en mampostería bloques de concreto reforzada con losa cimentación y cubierta losa prefabricada y tradicional.	31.44 m ²	Q. 2,073.01	Q. 829.20	Q 2,902.21
4	Módulo de servicios sanitarios en mampostería de ladrillo pineado con losa cimentación y cubierta losa prefabricada y tradicional.	31.44 m ²	Q. 2,215.77	Q. 886.31	Q 3,102.08
5	Edificio 2 pisos en mampostería reforzada bloques de concreto con zapata + cimiento corrido y losas prefabricadas.	248.00 m ²	Q. 3,593.63	Q. 1,437.45	Q 5,031.08
6	Salón de usos múltiples, troncos de cimentación, estructura de bambú expuesto con techo de lámina.	200.00 m ²	Q. 1,562.50	Q. 625.00	Q 2,187.50
7	Módulo de servicios sanitarios muro sobrecimiento en mampostería bloques de concreto, estructura de bambú y esterilla recubierta con repello y cernido.	25.00 m ²	Q. 1,562.50	Q. 625.00	Q 2,187.50

Tabla 8: Comparativo de precios de construcción según sistema constructivo.

Elaboración propia.

Con base en los resultados del anterior cuadro comparativo, se determina que el bambú puede ser una alternativa constructiva viable desde varios puntos de vista, tales como económico, tecnológico y ecológico, entre otros, con lo cual y dadas sus características físico-mecánicas permite su uso en grandes luces con el empleo técnicas adecuadas.

Aplicación teórica

Iglesia católica usando bambú como material estructural

PROCESO DE DISEÑO

Arquitectura Topológica

Durante la formación académica se experimenta con diferentes técnicas y procesos de diseño con el propósito de desarrollar la creatividad.

En los talleres que desarrollados durante la carrera se encuentra el de Arquitectura Topológica, que consiste en generar envolventes de forma orgánica, a través de la revolución de una tira de cartón, a la cual se continúan agregando tiras para conformar la volumetría.

Las siguientes imágenes forman parte del proceso experimentado:



FUNDAMENTO

Metáfora Arquitectónica

La iglesia católica que se propone a continuación, se fundamenta en el libro de Jonás. Relata la Biblia que Jonás fue un profeta rebelde, no comprende que Dios ame a los enemigos, razón por la que huye en barco a Tarsis para no obedecer el mandato divino. Durante el viaje admite que él es la causa de la tormenta que azota a la nave, por lo que solicita a los marineros que lo arrojen al mar. Dios le salva ordenando a un gran pez trague al profeta. Dentro del pez, el profeta agradece a Dios su misericordia; posteriormente, Dios ordena al pez que vomite a Jonás en una playa.



La volumetría del proyecto asemeja una ballena, en relación directa con la metáfora.
Aprovechando el trazo preliminar se generan espacios como un deambulatorio de ingreso.

Establecida la idea generatriz y la posible propuesta arquitectónica del proyecto, se procedió a desarrollar la geometrización y las propuestas de modulaciones estructurales para desarrollar la estructura portante del proyecto, para lo cual se desarrolló el proceso que se indica a continuación.

Elección del sistema estructural:

El sistema estructural deberá alinearse con la volumetría que se tiene previsto desarrollar, razón por la que la estructura portante del proyecto consistirá en arcos triangulados, para lo cual se tomarán en cuenta los criterios de los sistemas estructurales **de arco funicular y cercha plana** para plantear la propuesta.

Análisis	Criterio
Fuerzas actuantes	Compresión.
Cargas actuantes	Determinar la geometrización del arco.
Alto de arco	A mayor altura menor reacción en apoyos.
Empuje horizontal	Anclado al suelo
	Contrafuertes en anclaje de apoyo.
	Atirantar las bases del arco.

Tabla 9: Resumen criterios Sistema estructural “arco funicular”.
Elaboración propia.

Análisis	Criterio
Fuerzas actuantes	Compresión y tensión
Forma idónea	Triángulos
Alto de cercha	A mayor altura menor esfuerzos actuantes.
Número de divisiones	A mayor número de divisiones menor pandeo en el cordón superior.

Tabla 10: Resumen criterios sistema estructural “cercha plana”.
Elaboración propia.

Criterios de predimensionamiento estructural

Durante la investigación se encontraron normas técnicas y manuales de construcción en bambú, en ellas no se encuentra una metodología para el dimensionamiento de arcos en bambú, por lo que se emplearon criterios de dimensionamiento para madera, aplicándoles factores de seguridad, así como también, los criterios del sistema estructural analizados en el trabajo.

El arquitecto Jorge Escobar en su libro, *Predimensionamiento de elementos estructurales en arquitectura*, establece la siguiente relación entre: la longitud entre apoyos, altura y peralte para el dimensionamiento de arcos de madera, siempre que sea laminada:

Sistema métrico	Claro entre apoyos (L)	Altura (H)	Peralte (P)
Pies	50 - 60 pies	L / 4	2 pies
Metros	15.25 - 18.30 m		0.61 m
Pies	60 - 150 pies	L / 5	2 pies
Metros	18.3 - 45.75 m		0.61 m
Pies	150 - 180 pies	L / 5	3 pies
Metros	45.75 - 54.9 m		0.91 m
Pies	180 - 210 pies	L / 5	4 pies
Metros	54.9 - 64.05 m		1.22 m
Pies	210 - 240 pies	L / 4	5 pies
Metros	64.05 - 73.2 m		1.62 m

Tabla 11: Criterios dimensionamiento de arcos de madera laminada.
Elaboración propia. basada en Escobar (2007)

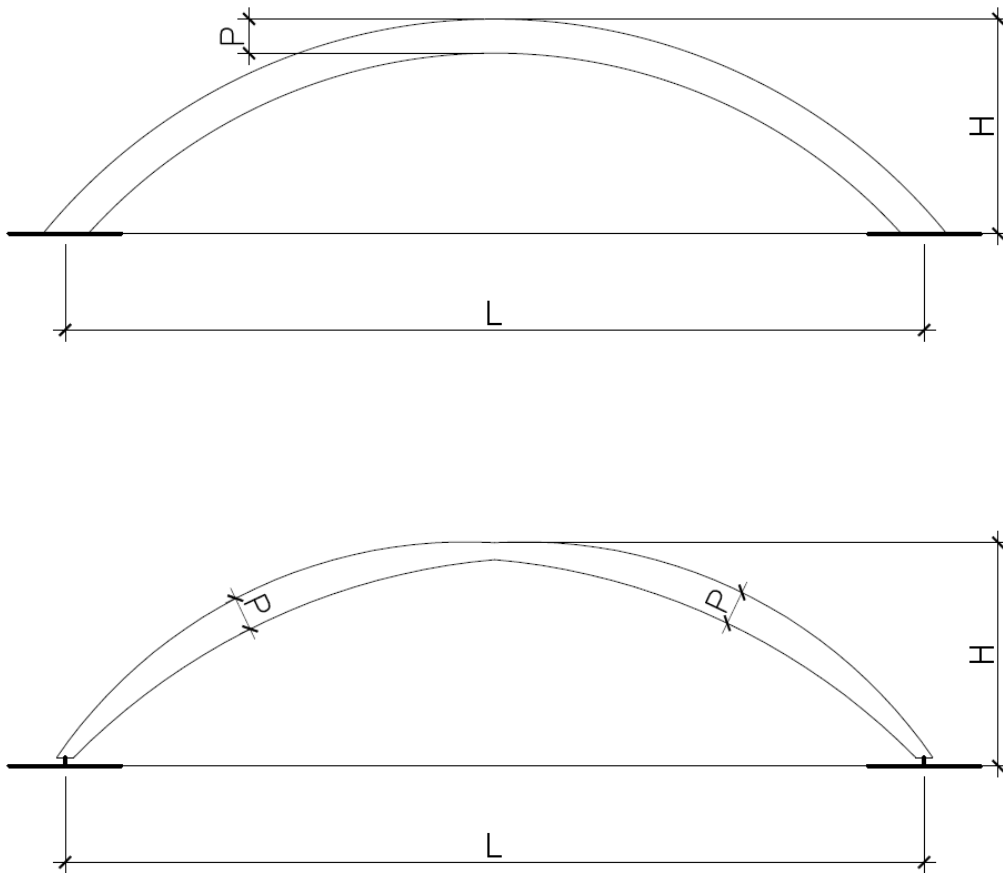


Imagen 86: Gráfica relación luz (L) y altura (H) en arcos de madera laminada o arcos triangulados en acero.

Elaboración propia, basada en Escobar (2007)

El autor también desarrolla procedimientos para el dimensionamiento de arcos en acero, los cuales también se pueden trabajar como arcos triangulados bidimensionales y tridimensionales, los cuales recomienda: “*resultando económico para cubiertas con luces de 40 y 300 pies*” (Escobar 2007), para realizar el dimensionamiento de arcos triangulados establece la siguiente relación:

Sistema métrico	Claro entre apoyos (L)	Altura (H)	Peralte (P)
Pies	40 - 90 pies	L / 5.5	1 pie
Metros	12.2 - 27.45 m		0.305 m
Pies	90 - 150 pies	L / 5.5	2 pies
Metros	27.45 - 45.75 m		0.61 m
Pies	150 - 210 pies	L / 5	3 pies
Metros	45.75 - 64.05 m		0.91 m
Pies	210 - 270 pies	L / 5.3	4 pies
Metros	64.05 - 82.35 m		1.22 m
Pies	270 - 300 pies	L / 5.5	5 pies
Metros	82.35 - 91.5 m		1.62 m

Tabla 12: Criterios dimensionamiento de arcos triangulados en acero.
Elaboración propia, basada en Escobar (2007)

Siguiendo los métodos presentados se obtienen los siguientes resultados para un arco con una luz de 20.00 metros entre apoyos:

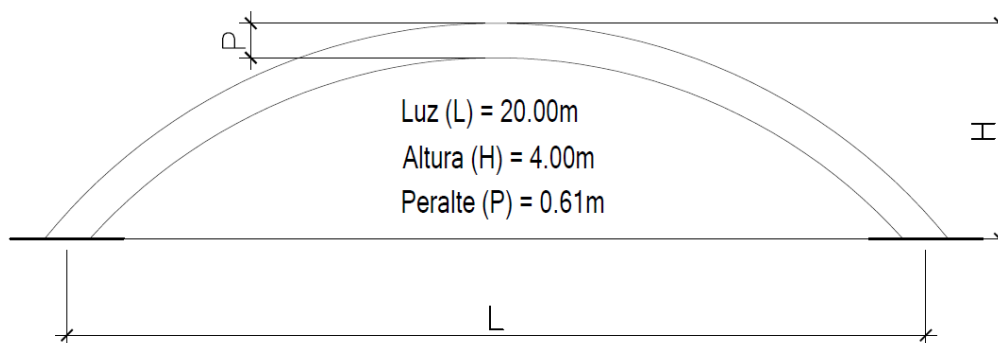


Imagen 87: Gráfica resultado relación luz- altura de arco en madera
Elaboración propia basada en Escobar (2007).

Con base en los resultados anteriores, se determina que la relación luz-altura obtenida generará altas reacciones de empuje que buscarán abrir el arco en sus apoyos, por lo que no es recomendable utilizar esta proporción en arcos fabricados con bambú cuya distancia sea menor a 25.00 metros, debido a que la altura que obtiene es baja, limitando el aprovechamiento del espacio.

Geometría aplicada

La geometría de las estructuras desempeña un papel importante, al apoyar el análisis de fuerzas actuantes al efectivo traslado de cargas y fuerzas en la estructura, razón por la que la geometría de la propuesta se debe analizar y formular aplicando principios de lógica estructural que permitan un comportamiento seguro y adecuado de la estructura portante.

Arcos catenarios

“El empleo de estas formas tiene un origen mecánico y se remonta a finales del siglo XVI. Hacia 1670 Robert Hooke plantea el siguiente problema en una de las reuniones de la Royal Societty... cuál es la forma ideal de un arco y cuánto empuja contra sus estribos. Hooke (1676) da la solución en un anagrama incluido en un libro sobre relojes: «Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así pero invertido, se sostendrá el arco rígido», (*Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum*).” (Tarrago 2013)

“La idea es entender el funcionamiento de los arcos por analogía con los cables colgantes: en efecto, el problema de equilibrio es idéntico. Se trata de una de las ideas más geniales de la historia del cálculo de estructuras.” (Tarrago 2013) La solución al problema planteado por Hooke lo resolvería Bernoulli en 1704, aunque matiza la afirmación realizada por Hooke: “... la forma ideal de un arco es la de una catenaria invertida y «si arcos de otras formas se sostienen es porque hay una catenaria en su interior»”. (Tarrago 2013)

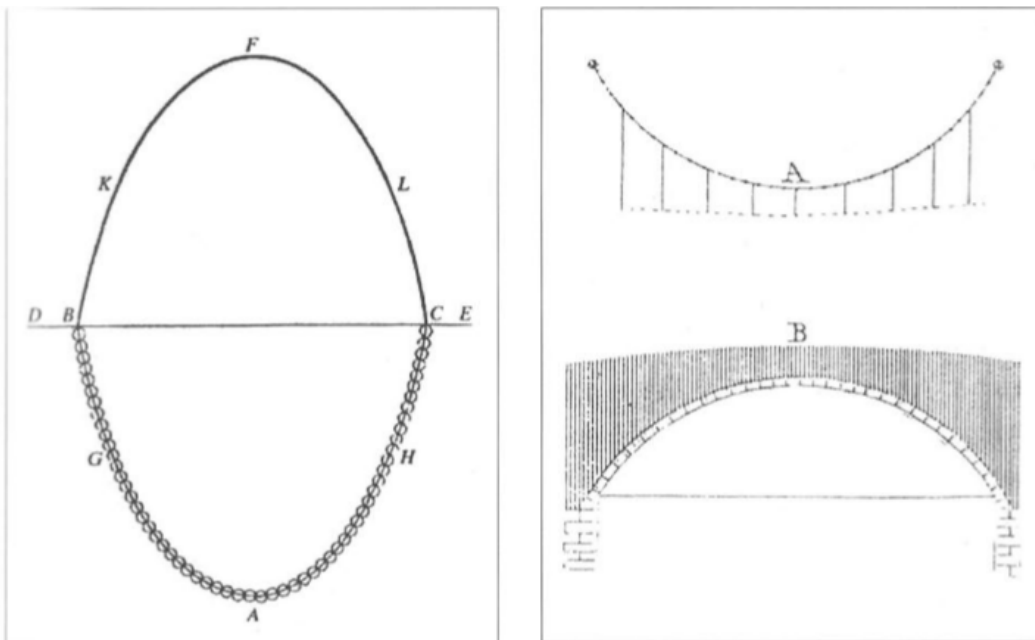


Imagen 88: La idea de Hooke sobre la analogía entre arco y cadena (izquierda) y cálculo de un puente empleando un modelo colgante (derecha).

Fuente: Tarrago (2013).

Relación entre estructuras tensadas y arcos catenarios

Para encontrar la relación entre ambos elementos, en primer lugar, se establece que las estructuras tensadas utilizan cables como medios principales de soporte. Los cables tienen la cualidad de presentar alta resistencia a efectos de tracción, pero ninguna resistencia a efectos de compresión o flexión, debiendo trabajar estrictamente a tracción. El autor Francis Ching describe que *“una forma funicular es aquella que adopta un cable libremente deformable como respuesta directa a unas cargas externas de unas determinadas magnitudes y puntos de aplicación. Haciendo que el cable adapte su forma bajo la acción de cualquier carga externa.”* (Ching, Onouye and Zuberbuhler 2014)

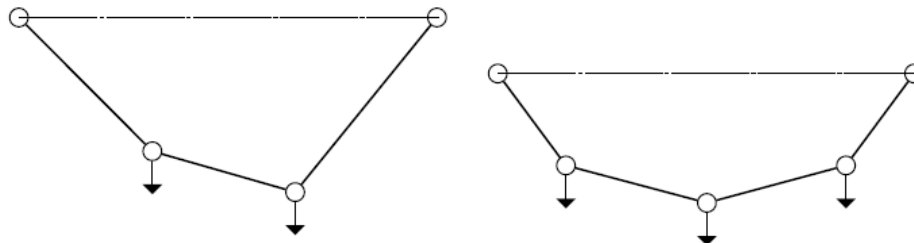


Imagen 89: Forma funicular = adaptabilidad del cable bajo la acción de cargas externas.

Fuente: Ching, Onouye and Zuberbuhler (2014)

Algunas características estructurales de las estructuras tensadas (Ching, Onouye and Zuberbuhler 2014):

- Para una carga uniformemente distribuida en proyección horizontal, la curva se aproxima a la de una parábola.
- Conforme aumenta el descuelgue de un cable, disminuyen los esfuerzos internos desarrollados en él.
- Las estructuras tensadas, suspendidas desde dos puntos situados a la misma altura, tienen una relación descuelgue entre 1/8 y 1/10.

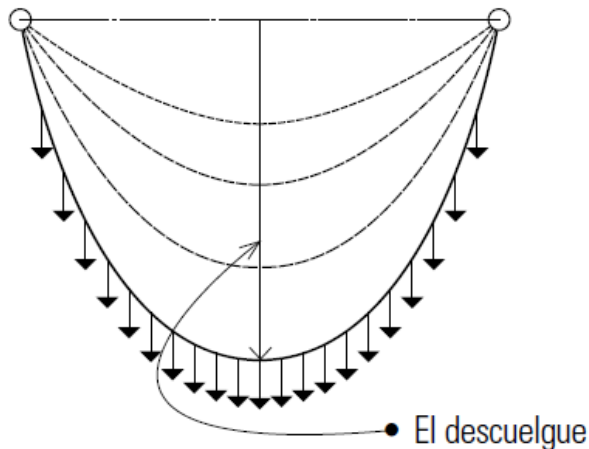


Imagen 90: El descuelgue de un cable suspendido en dos puntos a la misma altura.

Fuente: Ching, Onouye and Zuberbuhler (2014)

Con base en lo anterior, sabiendo que un arco catenario es resultado de un cable catenario que fue rotado 180 grados para que trabajara a compresión con esfuerzos mínimos, se pueden aplicar los conceptos que potencian al cable, haciendo a la vez que el arco se potencie. Para lograrlo se tomará la relación de descuelgo de 1/8 a 1/10 para predimensionar los arcos del proyecto.

Predimensionamiento estructural

Para resolver el predimensionamiento de arcos en bambú se emplearán 3 métodos, que buscan complementarse entre sí y salvar los vacíos de información existentes para su implementar su uso en el predimensionamiento de estructuras en bambú.

Como se indicó en el capítulo de fundamento estructural, una buena alternativa de diseño de arco es el método de la catenaria, el cual consiste en colgar una cadena en 2 puntos, los cuales representan los puntos de anclajes a la cimentación del arco, la cadena representa el peso propio del arco; si la estructura requiere de cargas puntuales o distribuidas, para ello se emplearán pesos atados a la cadena, que representan las cargas puntuales y una tablilla colgada de la cadena que representa la carga distribuida. Este método permite equilibrar la cadena que funciona a tracción, y al girar el sistema 180 grados, pasa a trabajar como un arco funicular que trabaja a compresión.

Se buscará que el arco tenga la forma más parecida a la catenaria, con ello se buscará reducir los efectos de reacción horizontal en el mismo (ver [imagen 8](#)), lo anterior se logra al tener una altura cercana a la mitad de la luz entre apoyos.

Un dato interesante es que el arquitecto catalán Antoni Gaudí empleó este método de diseño estructural llegando incluso a usar pedazos de tela como representación de superficies para el análisis y estabilización de las estructuras de proyectos como La Sagrada Familia, Las Cripta de la colonia Güell, El colegio de las Teresianas, Casa Batlló, logrando espacialidades interiores bastante revolucionarias para la época.

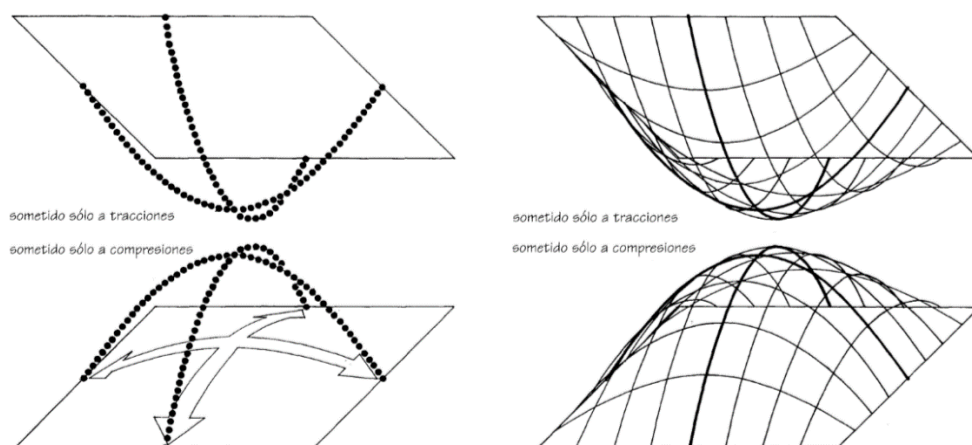


Imagen 91: Diseño por Catenaria de cable a arco funicular (izquierda) y de Malla en suspensión a estructura reticular cuadrada a compresión (derecha).

Fuente: Engel (2003)

Predimensionamiento de Peralte de la cercha

Para determinar el peralte de la cercha de bambú se usaron los criterios que expuso Josué Monterroso en el desarrollo de su tesis de grado, donde recomienda: "... que los valores para el peralte de un joist con bambú, debería estar entre los rangos de 10 a 15 por ciento de la luz efectiva a cubrir" (Monterroso Salazar 2014) debido a que, respecto al bambú no hay antecedentes de referencia para el diseño estructural.

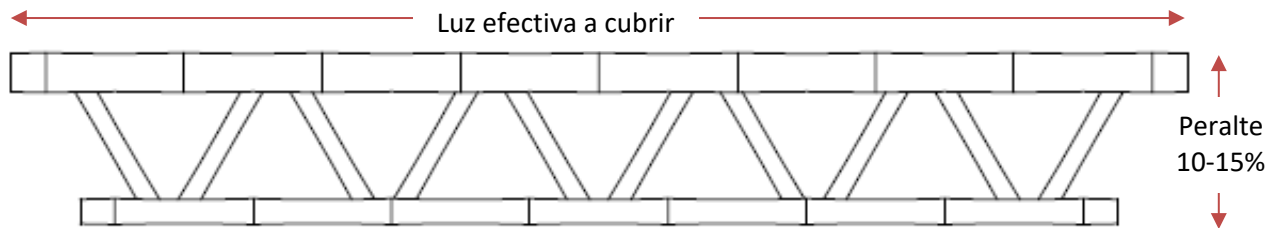


Imagen 92: Predimensionamiento de peralte "joist" con bambú.
Elaboración propia.

Con base en el anterior criterio se obtiene que, para una viga "joist" de 20.00 m de luz entre apoyos, el peralte estaría entre **2.00 m (10%) y 3.00 m (15%)**.

El arquitecto Jorge Escobar en su libro *Predimensionamiento de elementos estructurales en arquitectura* establece la siguiente fórmula para predimensionar el peralte de una armadura Warren:

Sistema métrico	Claro entre apoyos (L)	Peralte (P)
Pies	15 - 30 pies	L / 14
Metros	4.575 - 9.15 m	
Pies	30 - 75 pies	L / 22
Metros	9.15 - 22.875 m	
Pies	75 - 135 pies	L / 24
Metros	22.875 - 41.175 m	

Tabla 13: Criterios dimensionamiento de armadura Warren en acero.
Elaboración propia basada en Escobar (2007).

Siguiendo los rangos de la tabla anterior para una armadura Warren de 20.00 m de luz entre apoyos se obtiene que el peralte sería de **0.435 m**, claramente se entiende que es una altura para trabajar en metal, por lo que este método no es recomendable para dimensionar armaduras en madera o bambú, debido a las diferencias de resistencia entre materiales y a la complejidad de trabajar el elemento en un bajo peralte.

También es posible utilizar las gráficas del anexo del libro, *Comprensión de las estructuras en Arquitectura*, de Moore (2007), para establecer de forma preliminar las dimensiones de los elementos estructurales. Entre dichas gráficas se seleccionó la correspondiente a armadura horizontal de madera.

Para una armadura horizontal de 20.00 m de luz entre apoyos, los resultados obtenidos del peralte se ubican en el rango de entre **5 pies equivalentes a 1.525 m y 9 pies equivalentes a 2.745 m**. En la siguiente gráfica, se ubica la intersección de luz (L) y peralte (D).

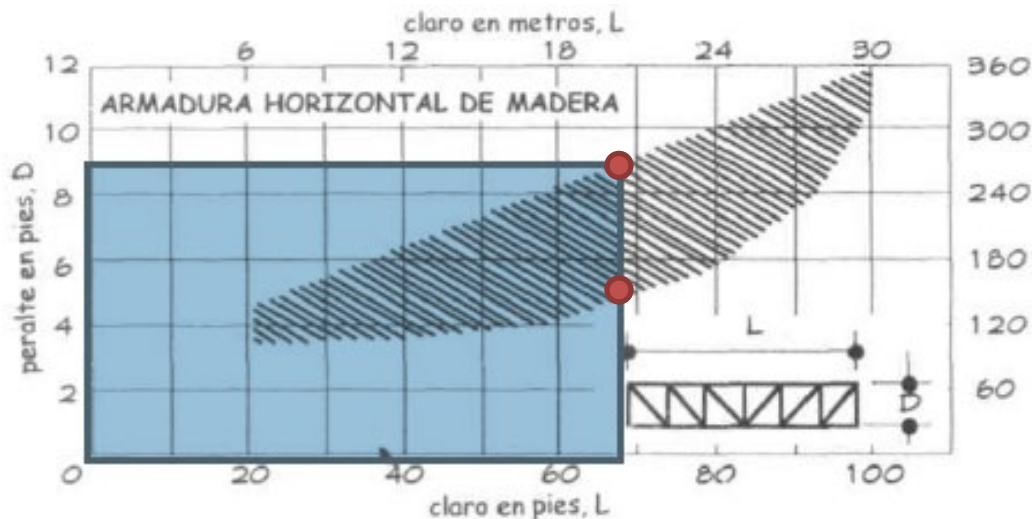


Imagen 93: Gráfica para el diseño preliminar de armadura horizontal de madera.
Fuente: Moore (2007).

Otro método de predimensionamiento para vigas es el explicado por Jörg Stamm, en una videoconferencia (J. Stamm 2020), este método fue empleado para la construcción de puentes en bambú para luces de 30 metros, para los cuales se determina el peralte de la viga multiplicando la luz libre por 20% empleando el concepto de contraflecha para contrarrestar los efectos de deflexión por carga de tránsito. Respecto del ancho del puente deberá ser del 10% de la luz libre, para reducir los efectos de volteo lateral por sobrecargas en determinado momento de uso.

Usando las recomendaciones de Stamm para puentes en bambú y aplicando los criterios de dimensionamiento para puentes en madera, por tener similitudes entre madera y bambú se obtienen los siguientes resultados para una luz de 20.00 m entre apoyos, el peralte sería entre **2.00 m (10%) y 4.00 m (20%)** utilizando el alto obtenido como una viga habitable, logrando un uso eficiente de los materiales.

Comparativa entre resultados obtenidos

A manera de resumen de los resultados obtenidos se presenta la siguiente tabla comparativa:

Criterio de dimensionamiento	Resultados de peralte de armaduras	Comentario
Monterroso	P = 2.00 m (10%) y	Aplicable para uso de bambú.
	P = 3.00 m (15%)	
Escobar	P = 0.435 m	No aplicable para uso de bambú.
Moore	P = 5 pies equiv. a 1.525 m	Aplicable para uso de bambú.
	P = 9 pies equiv. a 2.745 m	
Stamm	P = 2.00 m (10%) y	Aplicable para uso de bambú.
	P = 4.00 m (20%)	

Tabla 14: Comparativa de resultados dimensionamiento de peralte armadura.

Elaboración propia.

El método de predimensionamiento de Escobar para arcos en madera y madera laminada, se puede aplicar en el diseño y predimensionamiento de arco fabricado con productos laminado en bambú. Sin embargo, no se recomienda para el predimensionamiento de cerchas fabricadas con culmos de bambú, así como los parámetros para dimensionar el peralte de armaduras Warren, en la contraparte el método de Monterroso, Stamm y Moore podrían usarse para dimensionar la parte alta de cercha curva que se tiene prevista aplicar en el proyecto, eligiendo el resultado que mejor se adapte.

Selección de especie de bambú a utilizar

Al igual que con los sistemas constructivos y estructurales “tradicionales” o más conocidos en el medio, un punto primordial es determinar el material a utilizar y conocer sus límites para evaluar su aplicación. Con el bambú se debe aplicar el mismo principio para el diseño de estructuras en bambú, se debe conocer las capacidades de la especie de bambú, así como su adaptabilidad para la geometría del proyecto que se piensa diseñar, debido a que unas especies son más aptas para trabajar a compresión, tal el caso de *Gadua angustifolia* y otras a esfuerzos de tensión como lo es la *Dendrocalamus Asper*, permitiendo que una especie pueda ser curvada con mejores resultados que otra. Por lo que se deben tomar en cuenta las características físicas, que determinan las capacidades físico-mecánicas de cada especie, por ejemplo, una mayor distancia entre nudos permite curvar el bambú mejor que una especie con distancia entre nudos más corta.

Por lo anterior, se utilizarán culmos con su curvatura natural para reducir el trabajo de curvatura, utilizando la *Gadua angustifolia* en elementos portantes como la base de los apoyos y la especie *Dendrocalamus Asper* para los elementos curvos como las cerchas.

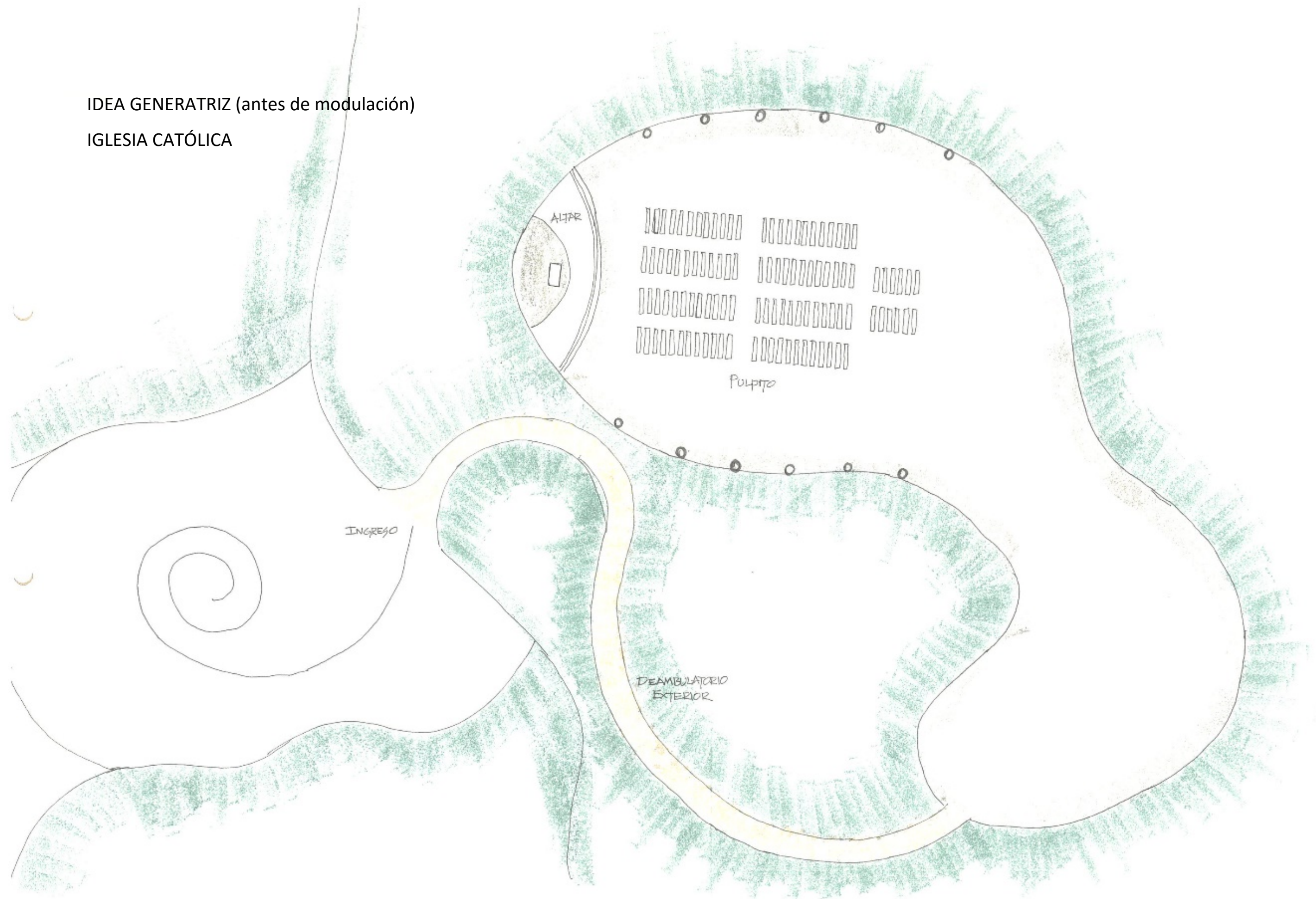
Selección de la técnica constructiva a utilizar

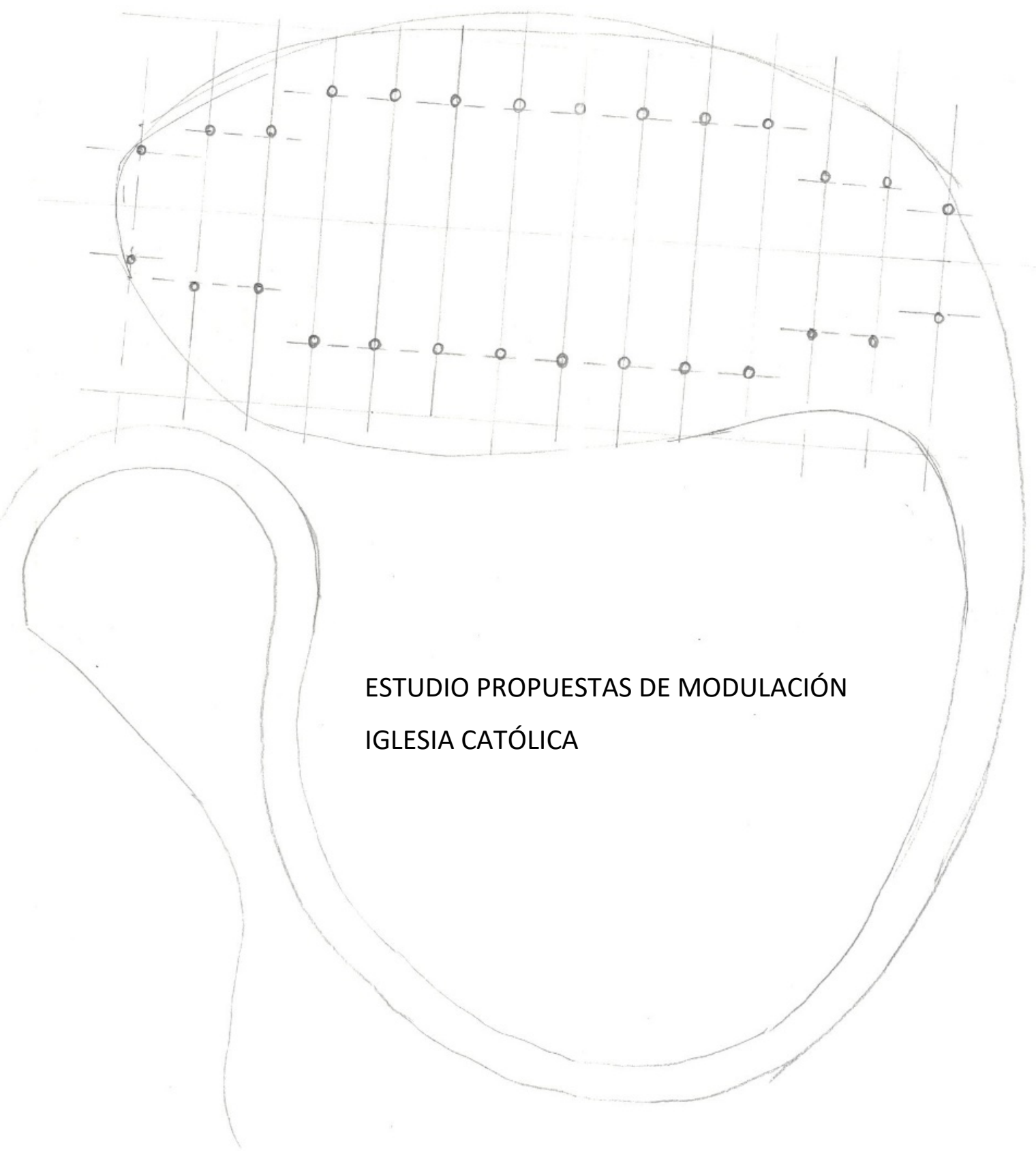
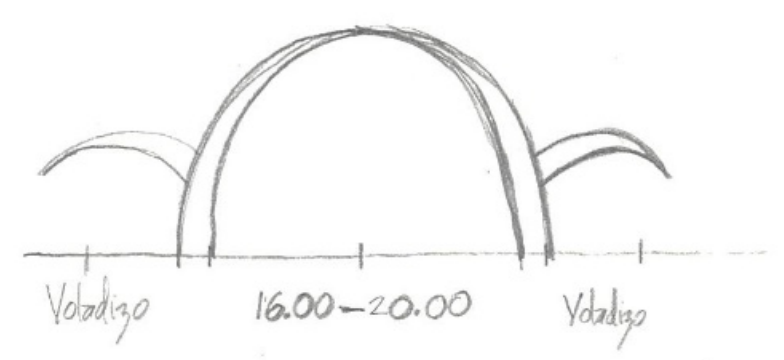
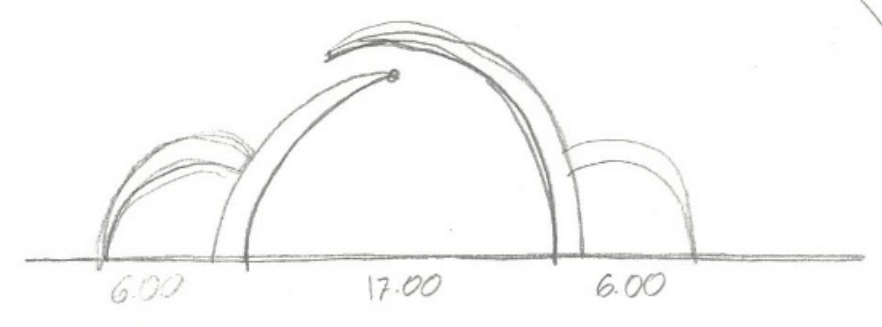
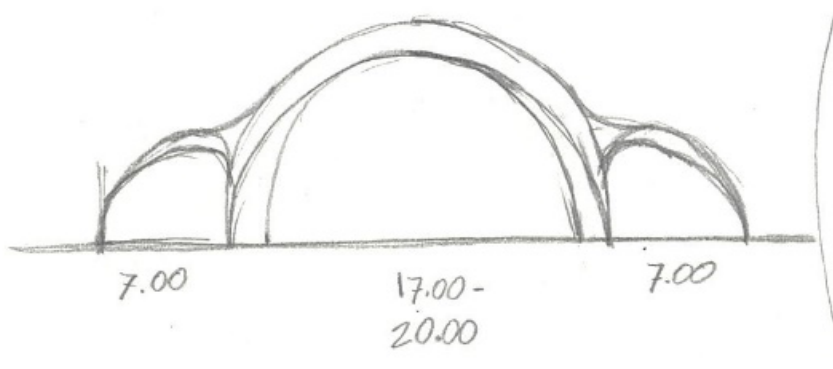
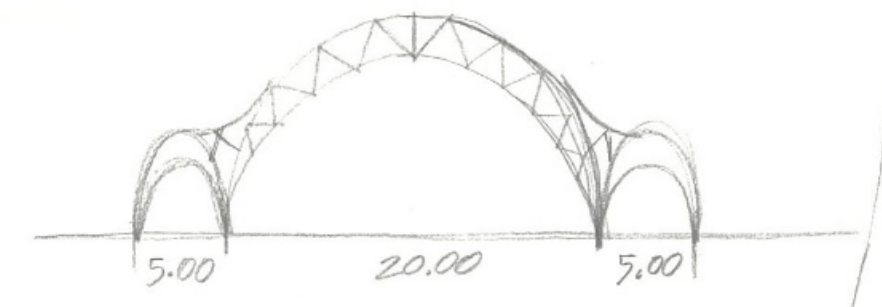
Así como se debe realizar un estudio sobre las especies y sus características para determinar cuál es la que se adapta mejor a los requisitos del proyecto, también se debe realizar un análisis sobre la técnica constructiva a emplear, eligiendo la forma de utilizar los culmos y el tipo de unión que se empleará.

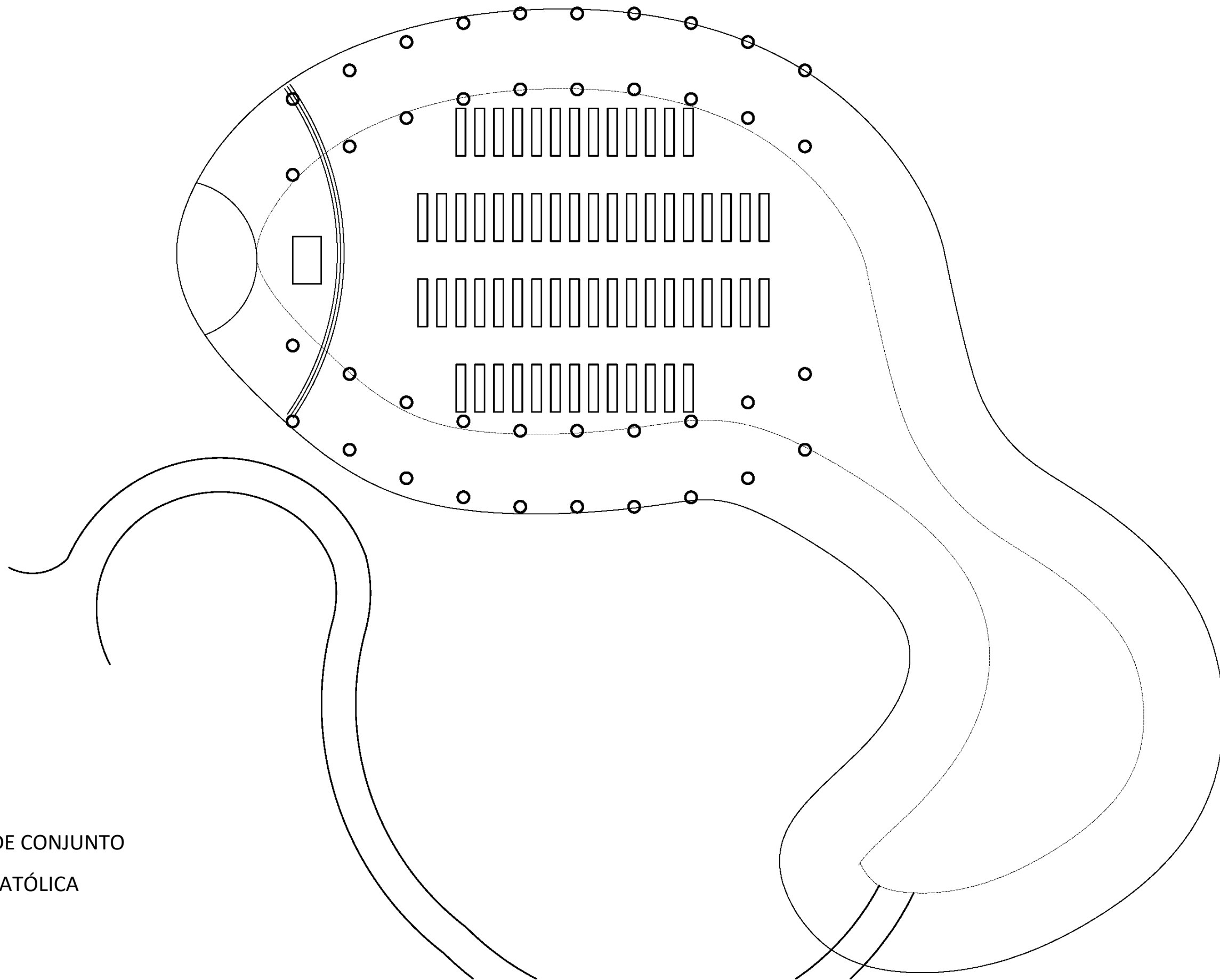
Para la fabricación de las cerchas en el proyecto se transformarán los culmos en latas para formar paquetes en los cordones superiores e inferiores haciendo más factible curvar el bambú y para los elementos diagonales se utilizarán los culmos sin transformar, logrando así obtener cerchas que se adapten a la forma orgánica del proyecto.

IDEA GENERATRIZ (antes de modulación)

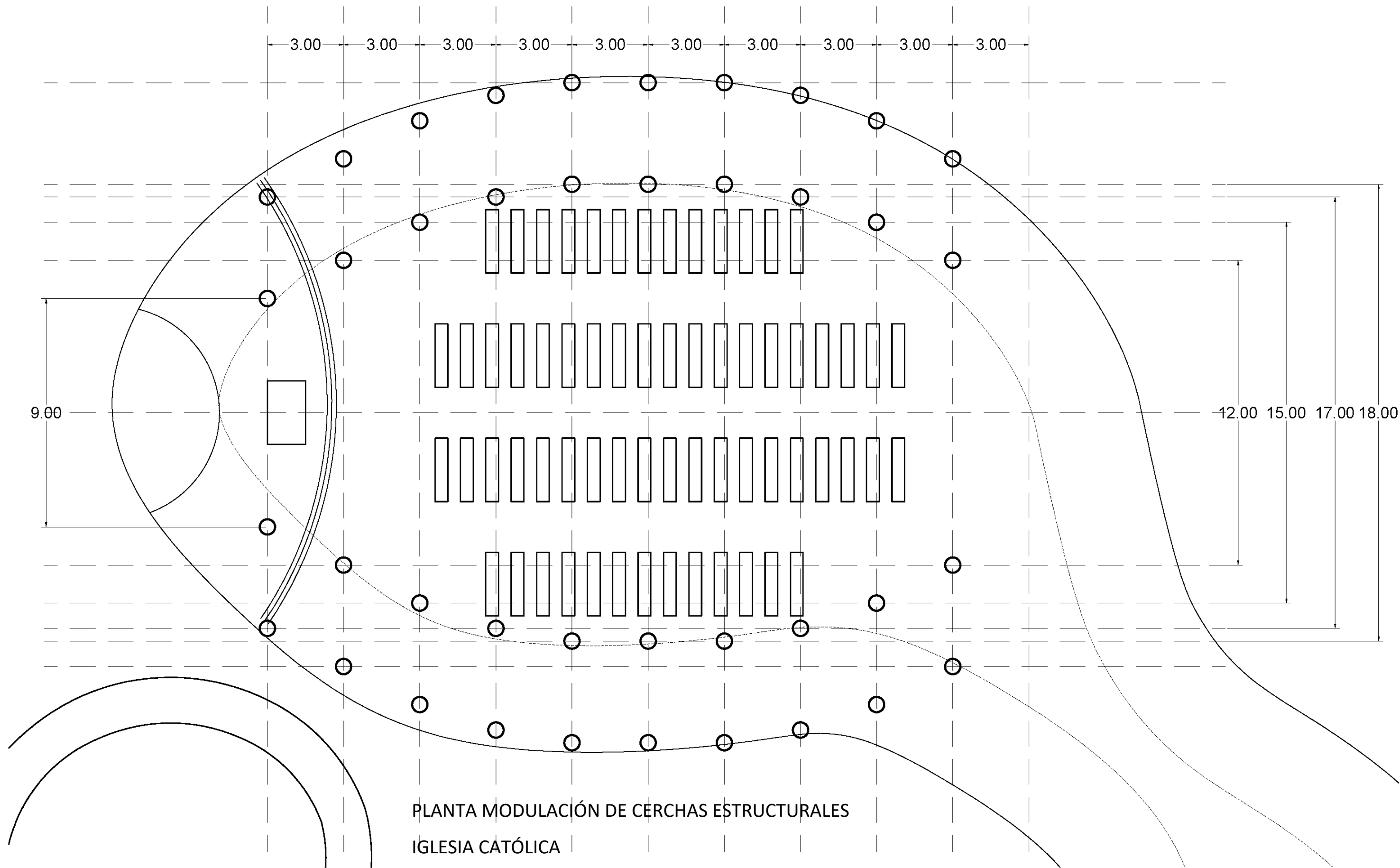
IGLESIA CATÓLICA

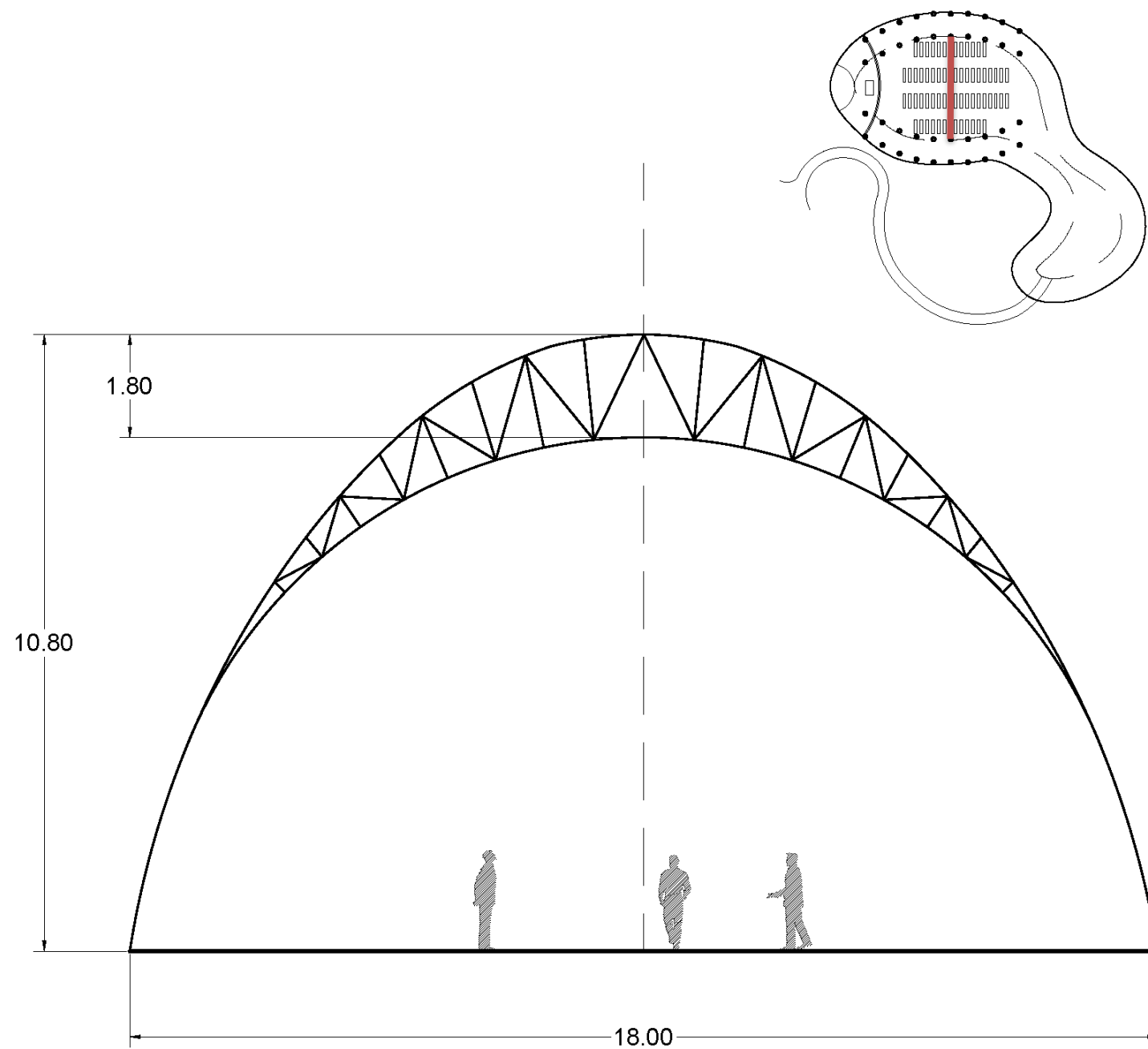




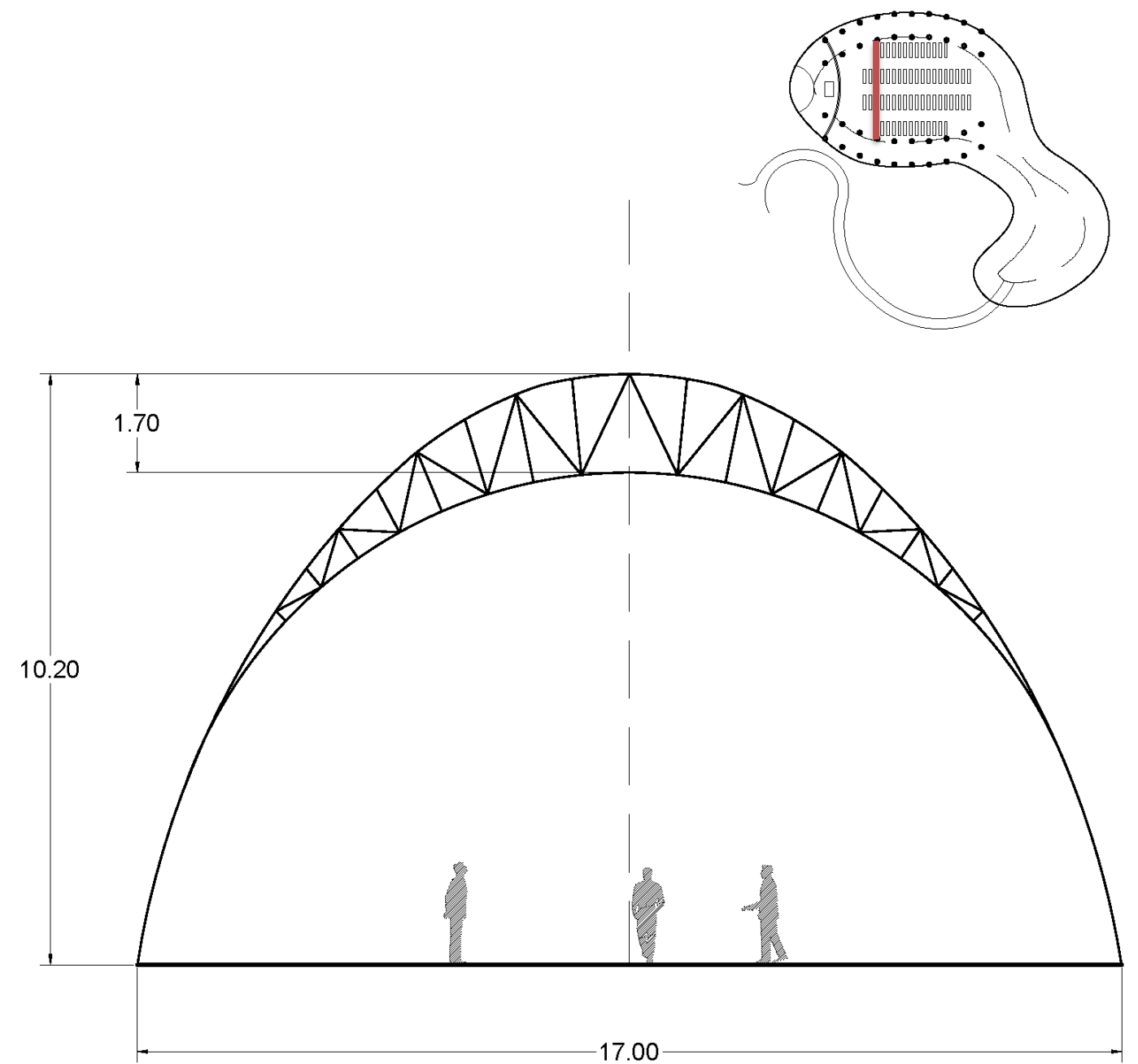


PLANTA DE CONJUNTO
IGLESIA CATÓLICA

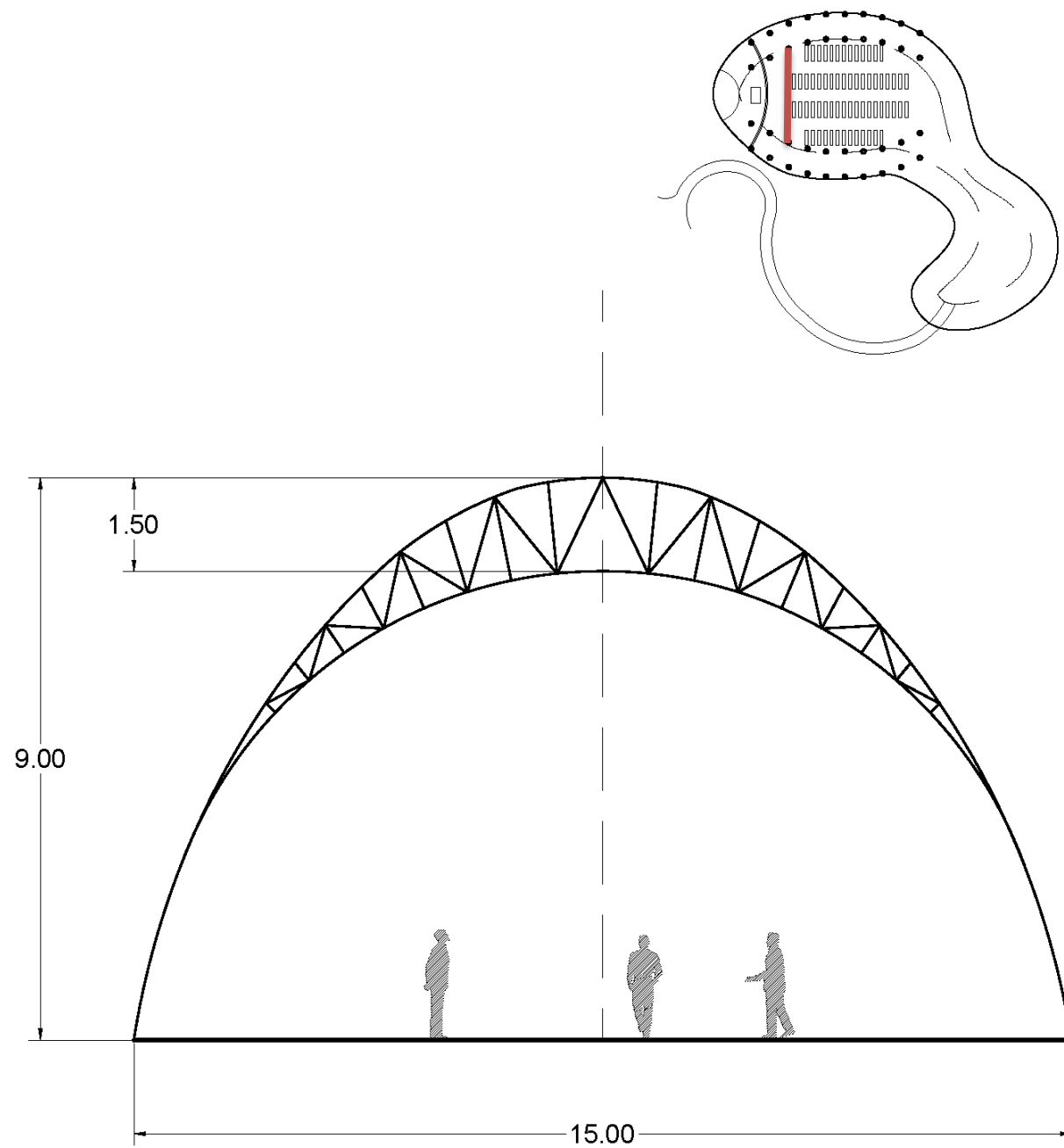




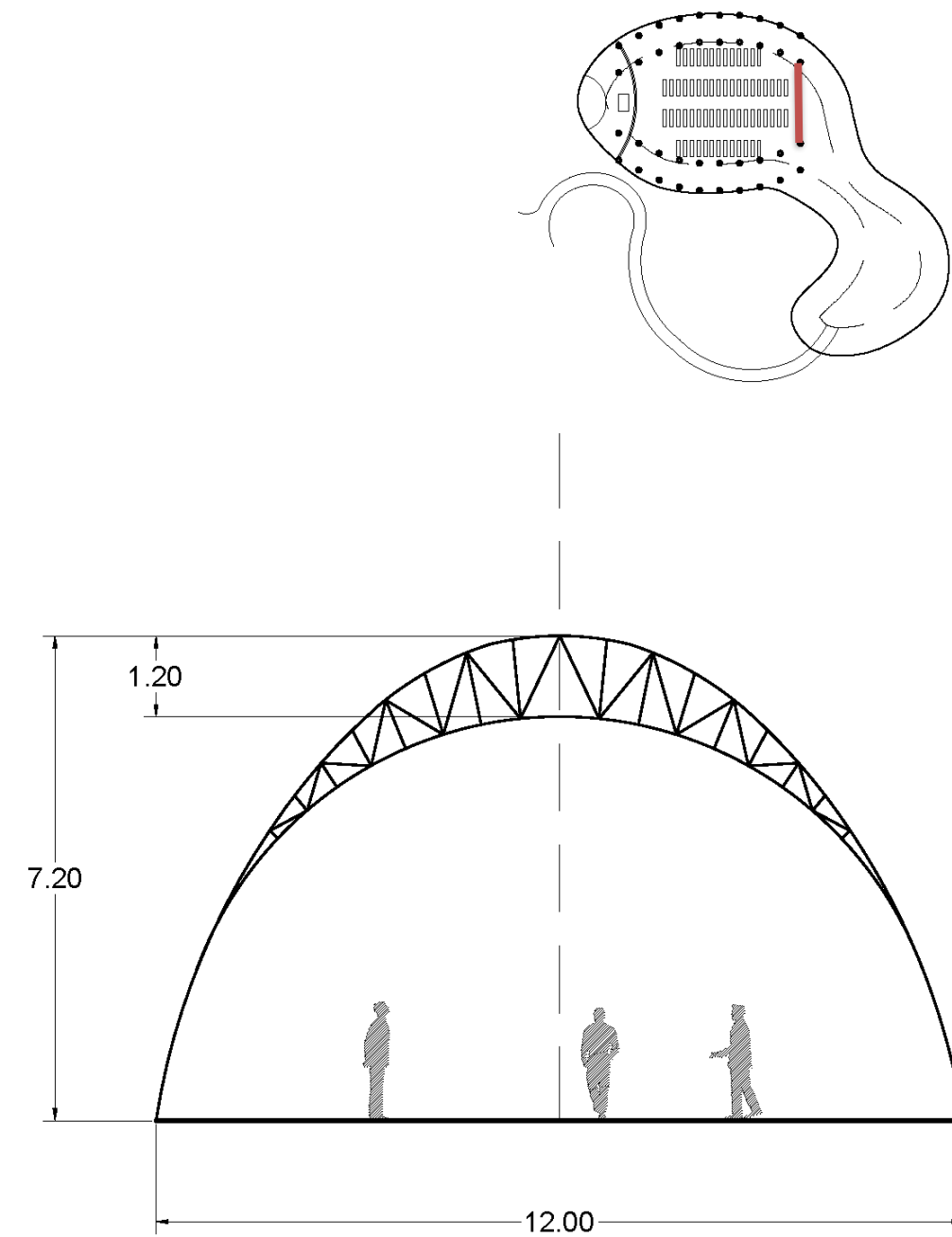
SECCIÓN MODULACIÓN DE CERCHA DE 18.00 METROS
IGLESIA CATÓLICA



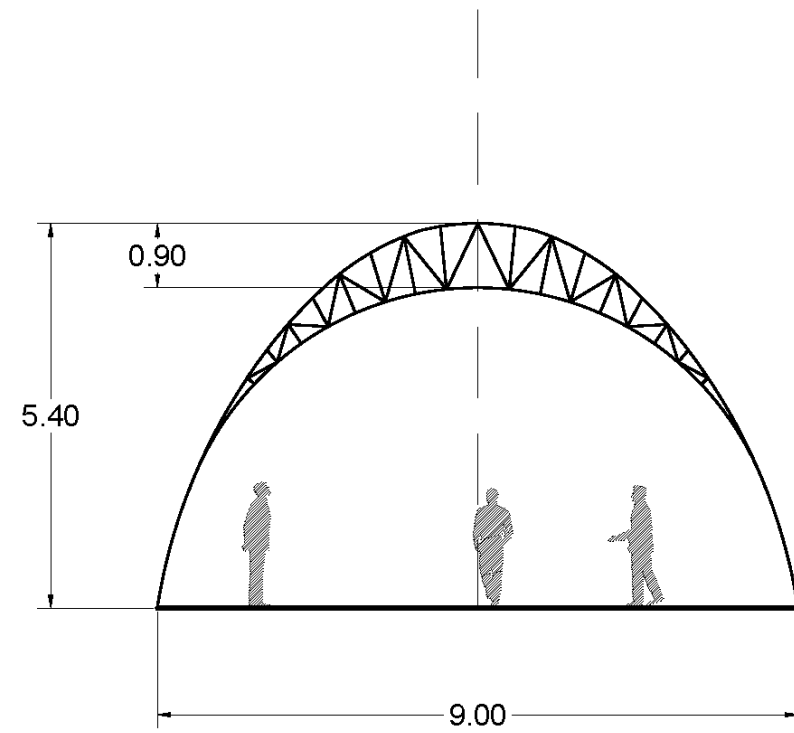
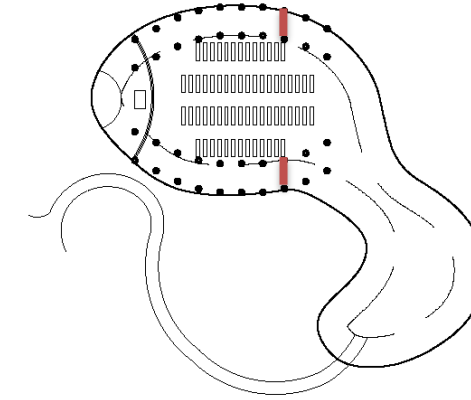
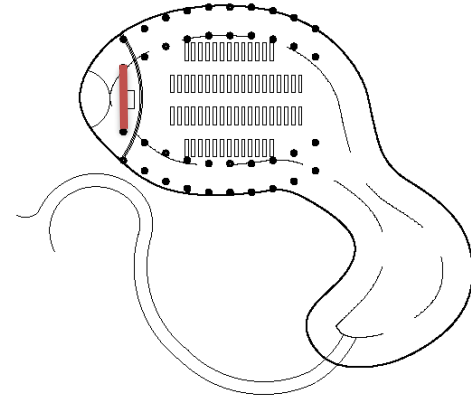
SECCIÓN MODULACIÓN DE CERCHA DE 17.00 METROS
IGLESIA CATÓLICA



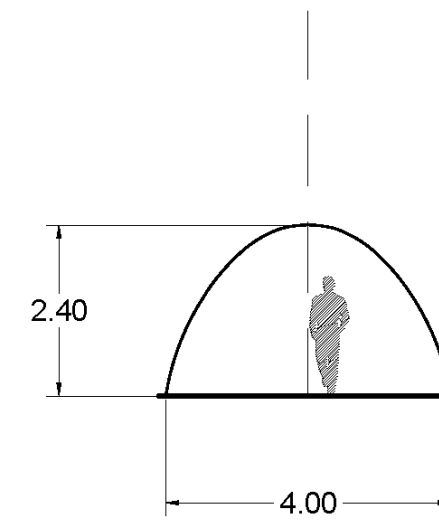
SECCIÓN MODULACIÓN DE CERCHA DE 15.00 METROS
IGLESIA CATÓLICA



SECCIÓN MODULACIÓN DE CERCHA DE 12.00 METROS
IGLESIA CATÓLICA



SECCIÓN MODULACIÓN DE CERCHA DE 9.00 METROS
IGLESIA CATÓLICA



SECCIÓN MODULACIÓN DE CERCHA DE 4.00 METROS
IGLESIA CATÓLICA

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describe el procedimiento aplicado para el predimensionamiento y geometrización de las cerchas, aplicando los conceptos recabados durante la investigación.

- 1) Para el dimensionamiento de la altura de los arcos se aplicó el método utilizado por Gaudí que busca trabajar con la catenaria, logrando reducir los esfuerzos internos en el arco. La relación base-altura del arco se estableció en 1/1.666, siguiendo la recomendación del capítulo 1 (ver [imagen 8](#)).

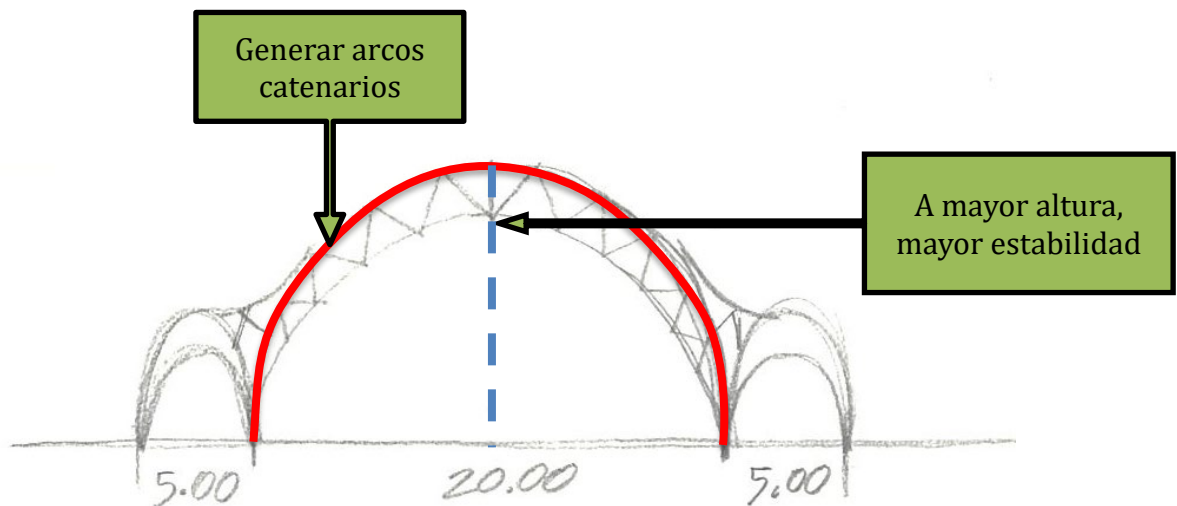


Imagen 94: Conceptos del arco catenario aplicados al proyecto.
Elaboración propia.

- 2) Para el predimensionamiento del peralte de las cerchas, se aplicó el porcentaje del 10% de la luz, obteniendo los siguientes resultados:

Cercha Tipo	Luz de cercha (m)	Factor	Peralte (m)
CB-1	18.00	10.00%	1.8
CB-2	17.00	10.00%	1.7
CB-3	15.00	10.00%	1.5
CB-4	12.00	10.00%	1.2
CB-5	9.00	10.00%	0.9

Tabla 15: Dimensionamiento de peralte de cerchas de bambú.
Elaboración propia.

- 3) Para realizar la geometrización de los portantes y diagonales, se ubicaron los portantes con 5.6 grados de separación, obteniendo de esta forma las dimensiones de las diagonales y portantes que conforman la cercha.

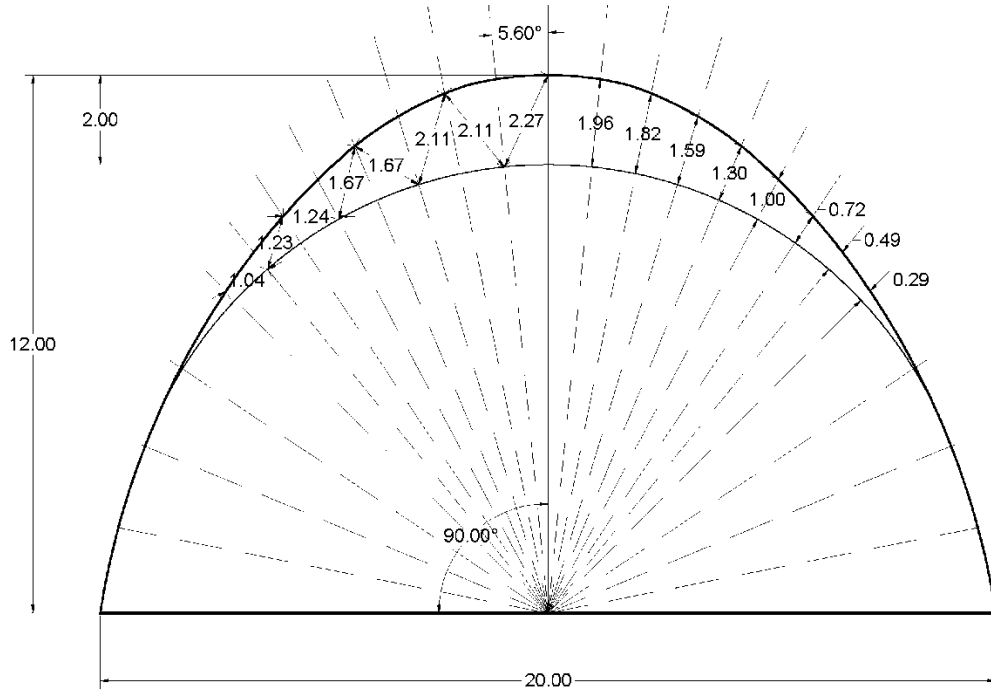


Imagen 95: Geometrización de los elementos de la cercha de bambú.
Elaboración propia.

El mismo procedimiento se aplicó a las cerchas restantes, de forma proporcional a la luz entre apoyos.

Alternativa para trazo geométrico de arcos

Como alternativa al trazo de la catenaria se puede utilizar el trazo de la parábola, puesto que la catenaria y la parábola guardan cierta similitud, permitiendo que el objetivo de reducir los esfuerzos en el arco sea alcanzado de forma muy parecida. Para el trazo de la parábola se puede emplear el trazo de un ovoide por su eje menor o el procedimiento descrito en la siguiente imagen, en donde se traza la figura de un huevo de gallina.

“Definida por el Número de Oro, la geometría del huevo de gallina en su forma paradigmática tiene en su segmento característico una parábola. Aunque conocer qué ocurre en el proceso de producción del huevo no es significativo para el conocimiento de la parábola o para el diseño de los arcos parabólico y apuntado, admira que solamente en la última parte de ese muy rápido proceso el huevo adquiera la proporción configurada por el Número de Oro, como origen de resistencia y belleza, para recién consolidarse en contacto con la atmósfera.” (Calvimontes Rojas n.d.)

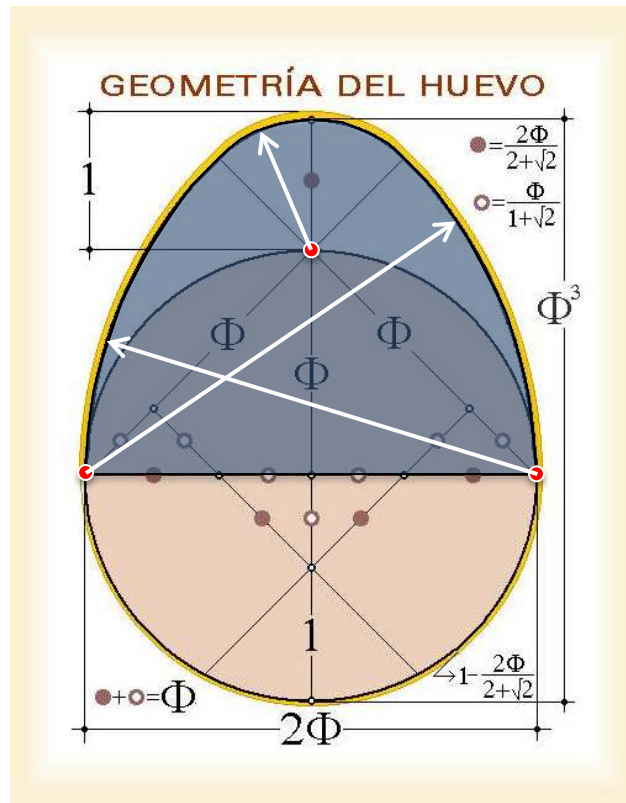


Imagen 96: Geometría del huevo - el eje menor es el radio de la parte baja de la parábola, en la intersección a 45 grados del radio del eje menor se obtiene el centro que forma la cumbre de la parábola.

Edición propia para enfatizar el arco de la parábola, con base en Calvimontes (s.f.)

CONCLUSIONES

El concreto trabaja de forma masiva y a compresión, lo cual lo hace pesado en comparación con el bambú, que trabaja a flexión lo cual le otorga ligereza y características sismo-resistentes. Como se constata en el presente trabajo, en especial en los casos de estudio analizados, se ilustra que existen varias alternativas para el empleo del bambú en grandes luces para techar canchas polideportivas, restaurantes, iglesias, salones y pabellones.

Como se comprueba en la investigación, la versatilidad del bambú es elevada y adaptable a los sistemas estructurales estudiados en el capítulo Fundamento estructural destacando en primer plano, la aplicación del bambú en la fabricación del arcos funiculares y cerchas planas, debido a la tecnificación de conocimientos vernáculos. En segundo plano figura su aplicación para domos geodésicos por el tema de herrajes y conectores para las uniones. En tercer plano se menciona la aplicación del bambú en mallas espaciales, actualmente esta aplicación, debido a la falta de desarrollo y estudio de una técnica apropiada no destaca; sin embargo, de salvar este obstáculo los resultados y potencialidades abrirían un nuevo camino en arquitectura e ingeniería desarrollada en bambú.

La versatilidad y flexibilidad de aplicación del bambú como material de construcción para estructura principal, usando criterios estructurales basados en la geometría es alta, al permitir su uso como un apoyo o viga, la unión de varios culmos (cañas) para formar sistemas estructurales que van: desde arcos triangulados y cerchas planas, hasta complejas mallas espaciales, pasando por membranas (estructuras regladas) tales como, paraboloides hiperbólicos e hiperboloides parabólicos que de forma independiente o combinada generan formas arquitectónicas y ofrecen una alternativa viable para arquitectos, ingenieros y constructores.

El método más recomendable para diseñar arco al igual que lo utilizó Antoni Gaudí es el empleo de catenaria que trabaja a tracción como un cable, permitiendo colocar pesos que representan cargas puntuales, o bien, colgarle tablillas que representen cargas distribuidas, estabilizando el arco, para girarlo 180 grados, convirtiendo el sistema en un arco funicular que trabaja a compresión con las cargas integradas a su forma.

Para el dimensionamiento de peraltes de cerchas planas, resulta seguro aplicar los porcentajes de 10 a 20% de la luz libre, según se adapte mejor al tipo de proyecto que se diseñe.

Debido a la morfología natural del bambú culmos (cañas) redondas huecas con tabiques internos a 0.50 m aproximadamente (esta distancia varía entre especie) con fibras longitudinales, se debe evitar utilizar clavos o tornillos para no rajarse o quebrarse el bambú. Por lo anterior, el anclaje a usar dependerá del sistema estructural elegido y del costo que se tiene presupuestado para el proyecto. Aunque existen diferentes tipos de anclajes en variedad de materiales, la solución comúnmente aplicada en uniones entre culmos (cañas) de bambú consiste en perforar los mismo y atravesar pernos o segmentos de varillas roscadas asegurados con tuercas y roldanas, o bien, unirlos con tarugos fabricados de bambú insertados en sentido oblicuo para generar un trabe.

Como se determinó en el cuadro comparativo de los precios de construcción, el uso de bambú como estructura portante resulta ser una alternativa viable, desde el punto de vista económico, que gracias a sus características físico-mecánicas permite su uso en grandes luces con el empleo de técnicas adecuadas.

Durante la investigación se encontraron fuentes documentales que tratan sobre el uso de bambú para refuerzo de concreto sustituyendo al acero, aunque el comportamiento del bambú en unión con el concreto ha generado resultados exitosos, la alcalinidad del cemento destruye la pectina de la celulosa, reduciendo el tiempo de vida de las fibras de bambú. Lo anterior permite concluir que, no es recomendable usar esa técnica estructural y, económicamente, tampoco es conveniente dicha aplicación utilizando bambú.

Para algunos entendidos en la materia, “El bambú es la madera del futuro”, afirmación certera, debido a que su rápido crecimiento permite cosecharlo en un período de 4 o 5 años. También debe considerarse que, un rizoma produce al menos 5 culmos (cañas) de bambú en sus primeros 3 años de vida, por lo que, en comparación con el tiempo de crecimiento de un árbol que necesita al menos el doble de tiempo y produce un solo tronco, se evidencia la versatilidad natural del bambú lo que lo convierte en un material sostenible.

El presente documento no pretende ser una respuesta definitiva con respecto al uso del bambú en grandes luces, sino más bien mostrar un abanico de posibilidades que ejemplifica soluciones desarrolladas en otros países. Así también, presenta las diferentes posibilidades de su aplicación como alternativa en busca de una arquitectura sustentable. Dichas posibilidades podrán ser mejoradas y ampliadas con la creatividad personal del estudiante o profesional, generando proyectos y soluciones interesantes aplicados a contextos específicos.

RECOMENDACIONES

El tema de estudio sobre el bambú en el país no ha sido cubierto en su totalidad, lo que ofrece la posibilidad de mejorar la investigación realizada hasta el momento, logrando aprovechar el avance e investigación desarrollada en otros países, tales como: China, Taiwán, Perú o Colombia, con el objetivo de desarrollar en el país normas y manuales que tomen en cuenta las condiciones sociales, económicas culturales y físicas de vulnerabilidad presentes en el país.

Conformar un grupo técnico desde la academia o bien, de profesionales que publicite el uso del bambú como material estructural, generando capacitaciones y documentos técnicos relacionados al tema.

La redacción e implementación de una norma técnica guatemalteca sismo resistente que regule la aplicación del bambú en la construcción, con el fin de hacer más confiable el empleo del bambú y lograr edificaciones más seguras con este material en el país.

REFERENCIAS

- AGIES, CONRED. 2008. *AGIES NSE 4-10 REQUISITOS PRESCRIPTIVOS PARA VIVIENDA*. Guatemala. Último acceso: 15 de agosto de 2018. <https://www.agies.org/wp-content/uploads/2019/02/agies-nse-4-10.pdf>.
- Beleck, William. 2019. *Nakamoto Forestry*. 11 de marzo. Último acceso: 07 de mayo de 2020. <https://nakamotoforestry.com/yakisugi-or-shou-sugi-ban-learn-what-you-should-call-it-and-why/>.
- Calvimontes Rojas, Carlos. s.f. *Geometría de la parábola según el número de oro de la armonía de la naturaleza a la de la arquitectura*. Último acceso: 29 de noviembre de 2021. <https://exapenta.neocities.org/PARABOLA.html>.
- Cano Díaz, Ericka Johanna. 2012. *Evaluación tecnológica de 3 especies de Bambú (Guadua angustifolia, Gigantochloa verticilata, Giganteus apus) para determinar su potencial industrial*. Guatemala: FONACYT.
- Ching, Francis D.K., Barry S. Onouye, y Douglas Zuberbuhler. 2014. *Manual de Estructuras Ilustrado (digital)*. Barcelona, España: Gustavo Gili. Último acceso: 20 de septiembre de 2020. https://editorialgg.com/media/catalog/product/9/7/9788425232725_inside_1.pdf.
- Ching, Francis. 2004. *Diccionario Visual de Arquitectura*. México: Gustavo Gili.
- Coto, José M. 1991. «Características generales del Bambú y sistemas de cultivo.» *CIDAP*. diciembre. Último acceso: 30 de mayo de 2021. http://documentacion.cidap.gob.ec:8080/bitstream/cidap/1296/1/Caracter%3%ADsticas%20generales%20del%20bamb%3%BA%20y%20sistemas%20de%20cultivo_Jos%3%A9%20M.%20Coto.pdf.
- Diccionario Enciclopédico Vox 1. 2009. «Culmo.» *The Free Dictionary*. Último acceso: 16 de mayo de 2020. <https://es.thefreedictionary.com/culmo>.
- Diez, Gloria. 2005. *Diseño Estructural en Arquitectura. Introducción*. Buenos Aires: Nobuko.
- Embajada de la República de China (Taiwan) en Guatemala. 2019. *El Proyecto Industrialización del Bambú en Guatemala ayuda a reconstruir el Tortugario de Hawaii, Santa Rosa*. 03 de Julio. Último acceso: 15 de septiembre de 2020. https://www.taiwanembassy.org/gt_es/post/17825.html.
- Embajada de la República de China (Taiwán) en Guatemala. 2019. *Inicio de Trabajos del Centro de Transformación e Investigación de Bambú en Guatemala con el apoyo del gobierno de la República de China (Taiwán)*. 16 de febrero. Último acceso: 15 de noviembre de 2020. https://www.taiwanembassy.org/gt_es/post/16136.html.

- Engel, Heino. 2003. *Sistemas de estructuras*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, S.A.
- Escobar, Jorge. 2007. *Predimensionamiento de elementos estructurales en arquitectura*. Guatemala: Casa Gráfica.
- Hidalgo López, Óscar. 1981. «Manual de construcción con bambú. Construcción rural 1.» *Universidad Nacional de Colombia; CIBAM*. Editado por Estudios Técnicos Colombianos Ltda. Último acceso: 15 de 09 de 2021. <https://guaduabambucolombia.files.wordpress.com/2016/02/manual-de-construccion-con-bambu.pdf>.
- Lin, Shyh-Shiun. 2007. *Construcción de casas con bambú*. Guatemala: ICTA & Taiwan ICDF.
- Lucila Aguilar Arquitectos. 2017. *Manual de Construcción con bambú*. Mexico: Edición digital. Último acceso: 08 de enero de 2021. https://assets.adsttc.com/content_files/Manual+de+Construccion+con+Bambu.pdf?utm_medium=website&utm_source=plataformarquitectura.cl.
- Lynch, Patrick. 2017. «Vo Trong Nghia Architects diseñan resort de bambú en bahía vietnamita.» *Plataforma arquitectura*. 26 de marzo. Último acceso: 13 de mayo de 2020. <https://www.plataformarquitectura.cl/cl/867886/vo-trong-nghia-architects-disenan-resort-de-bambu-en-primera-linea-de-bahia-vietnamita>.
- MAGA; Misión Técnica de Taiwán en Guatemala. 2019. «El bambú, mina de oro verde: proyecto Industrialización del bambú en Guatemala.» *Taiwán ICDF*. Wu, Yvonne T.S. video 4:49 min. 07 de octubre. Último acceso: 14 de agosto de 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=AAIKRkCyR8>.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. 2016. *Guía Básica para el Cultivo de Bambú en Guatemala*. Editado por Viceministerio de Desarrollo Económico Rural - Departamento de Cultivos Agroindustrializables. Guatemala: Mayaprin.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. 2009. *Norma Técnica E. 100 Bambú*. Lima, Perú: Edición digital. Último acceso: 20 de enero de 2020. <http://www.munisantamariadelmar.gob.pe/documentos/Licencia%20de%20Edificacion%202/titulo3/2/E.100%20BAMB%C3%9A%20DS%20N%C2%B0%20011-2012.pdf>.
- Minke, Gernot. 2010. *Manual de Construcción con Bambú*. Cali, Colombia: Merlin S.E.
- Monterroso Salazar, Josué Jonattan. 2014. *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE VIGAS JOIST PARA ESTRUCTURAS DE TECHOS LIVIANOS, FABRICADAS CON BAMBÚ*. Guatemala, Guatemala: Edición Digital TESIS DE GRADO. Último acceso: 21 de abril de 2020. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3724_C.pdf.
- Moore, Fuller. 2001. *Comprensión de las estructuras en arquitectura*. México: Mc Graw Hill.
- Morales Jolá, Hernan Eduardo. 1985. «Propiedades físico-mecánicas del bambú: (6 especies recolectadas en los departamentos de Guatemala, Santa Rosa y Jutiapa).» Tesis de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. USAC, Guatemala.

- PDD Profesor de Dibujo. 2012. *Trazar un ovoide (según su eje menor)*. Canal de Dibujo Técnico, Geometría Plana y Sistemas de Representación, video 3 min. 19 de octubre. Último acceso: 02 de diciembre de 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=fB-yPE3eVqg>.
- Peña, Clara María. 2015. «Solución bambú: Guía para el manejo sustentable del Género *Phyllostachys*.» *Gobierno de la provincia de Buenos Aires; INBAR*. Último acceso: 27 de abril de 2020. <http://www.unmundodebambu.com.ar/librosdebambu/SB.pdf>.
- Real Academia Española. 2017. *Diccionario de la lengua española*. España: ESPASA CALPE.
- Salazar Jaramillo, Álvaro Andrés, Carlos Mauricio Quintero Suarez, y Gerardo Fonthal. 2016. «Revisión de la norma ISO-N314-22157 para estandarizar los ensayos de compresión paralela en la guadua angustifolia Kunth.» *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(2), 056-063. agosto. Último acceso: 11 de marzo de 2020. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0254-07702016000200002&script=sci_arttext.
- Seely, Fred B., y James O. Smith. 1974. *Resistencia de materiales*. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana.
- Stamm, Jorg. 2020. *Siete conceptos básicos para diseñar puentes de bambú*. BAMBUTERRA SAPI DE CV, video 2:42 h. 11 de agosto. Último acceso: 28 de mayo de 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=gN2jIGt2dhQ&t=2447s>.
- Stamm, Jörg. 2009. «Siete conceptos para hacer un Puente en Bambú.» *8° World Bamboo Congress*. Thailand: Bambúes de México. 21. Último acceso: 10 de junio de 2021. https://www.academia.edu/6885668/Siete_Conceptos_para_hacer_un_Puente_en_Bamb%C3%BA.
- Tarrago, Salvador. 2013. «El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí.» En *Miscelanea*, de Salvador Tarrago, 133-162. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech.
- Torres Rojas, José Eduardo. 2020. *Cuáles son y cómo actúan los esfuerzos en las estructuras de bambú*. Bambuctura y Sostibilidad, video 10:53 min. 03 de septiembre. Último acceso: 26 de julio de 2021. https://www.youtube.com/watch?v=R4o_3g8zpdA&ab_channel=BAMBUCTURA%26SOSTENIBILIDAD.
- Ubidia, Jorge A. Morán. 2000. *Preservación del Bambú en América Latina mediante métodos tradicionales*. Guayaquil, Ecuador: International Network for Bamboo and Rattan - INBAR. Último acceso: 10 de abril de 2020. <https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2020/05/1489455969.pdf>.
- Urrutia Revilla, Juan Francisco. 1983. «Propiedades físico-mecánicas del bambú: (Estudio preliminar de 6 especies de la finca Chicolá, Suchitepéquez).» Tesis de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, USAC, Guatemala.
- Valdez Cancinos, David. 2013. *Manual para el cultivo de bambú - Experiencias en Guatemala*. Guatemala: Disciplina de Divulgación ICTA.

- Valdez Cancinos, David. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; ICTA. 2013. *Manual para el cultivo de bambú experiencias en Guatemala*. Último acceso: 10 de marzo de 2020. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Bambu/Manual%20para%20el%20cultivo%20de%20bambu,%202013.pdf>.
- Vargas Sabogal, Diego. 2017. *La guadua crece cuadrada en Ulloa*. InformativoCVC, video 2:14 min. 1 de febrero. Último acceso: 25 de junio de 2020. https://www.youtube.com/watch?v=lqjB_izNhwM.
- Villegas, Marcelo. 1989. *Bambusa Guadua*. Bogotá: Villegas Editores.



EDICIONES TM

Norma Leticia Toledo Morales
Licenciada en Letras
Colegiada No. 22970

Guatemala, 06 de abril del 2022

MSc. Arquitecto
Edgar Armando López Pazos
Decano
Facultad de Arquitectura
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado señor Decano:

Atentamente, hago de su conocimiento que llevé a cabo la revisión de estilo y lingüística del proyecto de graduación del estudiante, Willen Omar Mérida Mijangos, carnet 200112246, de la Escuela de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, titulado:

Aplicaciones de bambú para grandes luces.

Proyecto de grado, previo a conferírsele el título de Arquitecto, en el grado académico de licenciado.

Luego de las adecuaciones y correcciones pertinentes en el campo lingüístico, considero que el proyecto de graduación que se presenta, cumple con la calidad técnica y científica requerida.

Al agradecer la atención que se sirva brindar a la presente, me suscribo respetuosamente.


Norma Leticia Toledo Morales
Licenciada en Letras
nortolmo2@gmail.com
WhatsApp 35498645 y Cel. 59469408

*Norma Leticia Toledo Morales
Licenciada en Letras
Colegiada 22970*

APLICACIONES DE BAMBÚ PARA GRANDES LUCES

Proyecto de Graduación desarrollado por:


Willen Omar Mérida Mijangos

Asesorado por:


Arq. Israel López Mota


Arq. Alejandro Muñoz Calderón


Ing. José Marcos Mejía Son

Imprimase:



FACULTAD DE ARQUITECTURA - USAC
DECANO

MSc. Arq. Edgar Armando López Pazos
Decano

