

PARAMETRIC DESIGN APPLIED IN THE DEVELOPMENT OF STRUCTURES (Case study: Bamboo Spiral Structure)

José M. Domínguez
E.T.S.A.S
Sevilla, España
Jose_989@msn.com

Rubén R. Hernández
U.A.B.J.O.
Oaxaca, México
rufaz@hotmail.com

Sandra A. Mansilla
Universidad de Córdoba.
Córdoba, Argentina
sandru.mansilla@gmail.com

RESUMO

A finalidade do presente artigo é apresentar as possibilidades do desenho paramétrico aplicado no desenvolvimento de estruturas no campo da arquitetura e da engenharia. O estudo de caso será numa estrutura em espiral, sendo o bambu o principal material estrutural.

ABSTRACT

The aim of this paper is to show the possibilities of the parametric design applied in the development of structures in the field of Architectural Design and Engineering. The case study will be a spiral structure, built using bamboo as the main structural material.

PALAVRAS CHAVES: structure, geometry, bamboo, parametric.

DISEÑO GENERATIVO

La metodología generativa consiste en la transformación y combinación, en algunos casos de tipo recursiva, de información. En el presente caso de estudio, esta información se usará como base para la generación de geometría.

Estas herramientas denominadas paramétricas, generativas o algorítmicas están fuertemente vinculadas a la computación. El ordenador permite el control de una gran cantidad de datos, permitiendo al diseñador definir esta máquina generativa, la cual podríamos definir como sistema formal.

Este sistema (Figura 1) es generado a partir de restricciones de tipo geométricas, numéricas o lógicas que interactúan, se combinan y modifican entre ellas, usando como base los parámetros de entrada definidos por el diseñador. Se genera entonces un flujo bidireccional de información, en el que la modificación de cualquiera de los elementos que lo componen afectan al sistema completo en tiempo real, gracias a la capacidad de procesamiento del ordenador.

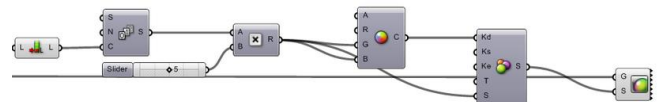


Figura 1. Definición algorítmica usando un lenguaje de programación visual

INTRODUCCIÓN

El proyecto se inscribe en el ámbito de la arquitectura enfocado a presentar las posibilidades de las herramientas paramétricas dentro de la academia.

Se plantea como ejercicio proyectual dentro de la asignatura TPI IV (Trabalho Projetual Integrado IV) de la FAAC (Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação).

El enunciado del proyecto plantea la creación de un espacio de uso colectivo en el Horto Florestal de Bauru, siendo una de las premisas el uso de materiales que generen el menor impacto ambiental posible.

La solución planteada hace uso de las herramientas paramétricas desde el comienzo, partiendo de un estudio de soleamiento (Figura 2) de carácter estadístico tras el que se determina la localización idónea de la propuesta.



Figura 3. Render de la propuesta

El desafío consiste en llevar a la realidad la estructura principal de la propuesta (Figura 4) definida a partir de una geometría orgánica en forma de espiral, teniendo en cuenta dos premisas básicas: el uso del bambú como material estructural principal y la simplicidad de las uniones entre los distintos elementos que componen la estructura.

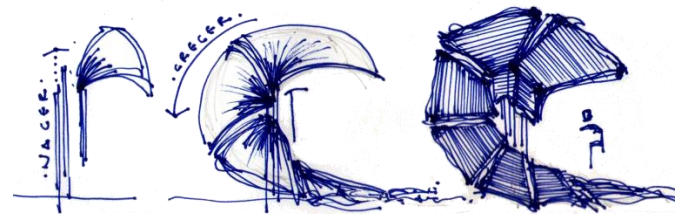


Figura 4. Croquis síntesis de la idea

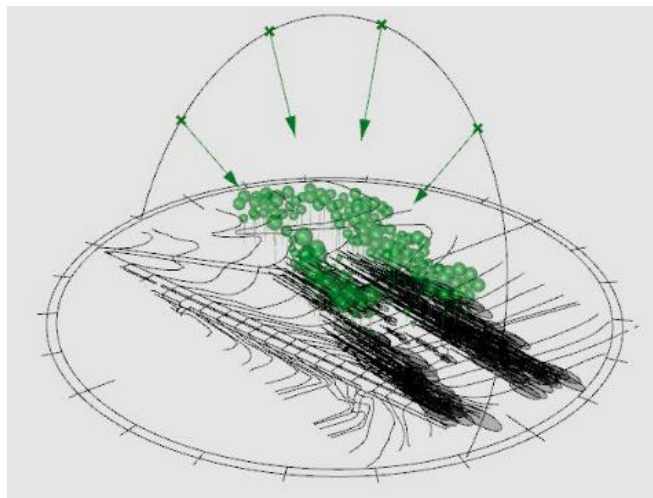


Figura 2. Estudio de soleamiento

Se plantea una solución (Figura 3) cuya formalización en planta recurre al uso de polígonos regulares que posibilitan un crecimiento progresivo de la propuesta, que se organizan en torno a una serie de estructuras, las cuales serán el objeto de estudio del caso propuesto.

La resolución estructural debe responder adecuadamente a la complejidad de la geometría como así también a las posibilidades, y limitaciones, que otorga el material. Por lo que nos apoyaremos en las herramientas brindadas por un software de diseño paramétrico a fin de estudiar diferentes posibilidades de resolución del desafío inicial.

Una vez obtenidos tales resultados y definida su aptitud técnica, la ejecución de la estructura final se llevará a cabo dentro de un marco académico universitario con el objetivo de verificar la viabilidad de la misma.

EL MATERIAL

Se plantea el uso de bambú como material principal tanto por la abundancia del mismo en la zona a intervenir, como por su estética y principalmente, sus características mecánicas tanto a tracción como a compresión.

Junto a estas características podemos añadir el rápido crecimiento, debido al crecimiento simultáneo entre los distintos colmos. Es un recurso, por tanto, renovable y sostenible que actúa como regenerador de suelo y la cantidad de energía necesaria para procesarlo es muy baja, con respecto al acero u otros materiales de obra.

Como inconvenientes, podemos señalar el hecho de que su resistencia a fuerzas perpendiculares a la fibra es baja, lo que puede originar una tendencia a romper en la dirección paralela a las fibras.

La construcción en bambú necesita una protección mediante el correcto diseño de la misma, que asegure que no recibe directamente la humedad del suelo, así como un tratamiento específico que garantice su resistencia frente a hongos y agentes xilófagos.

Concretamente se elige la especie "Guadua" (Figura 5). Es una de las muchas especies de bambú. Su diámetro exterior tiene un promedio de 12 cm. con un diámetro interior de entre 8 a 10 cm. La guadua llega en sólo 6 meses a una altura de hasta 12 m. considerándose madura a partir de los 3 años.



Figura 5. *Guadua Angustifolia Kunth*

ANTECEDENTES CONSTRUCTIVOS



Figura 6. Cúpula elipsoidal en Tlamaya, de Biagio di Carlo



Figura 7. Puente tradicional de guadua en colombia



Figura 8. Green School de Jorg Stamm



Figura 9. Panyaden School, Chiang Mai (Tailandia)

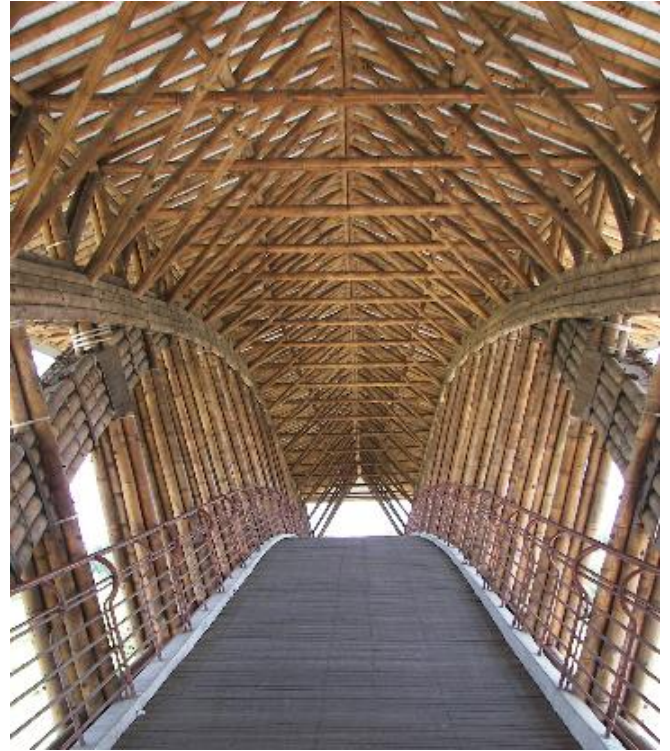


Figura 10. Panyaden School, Chiang Mai (Tailandia)

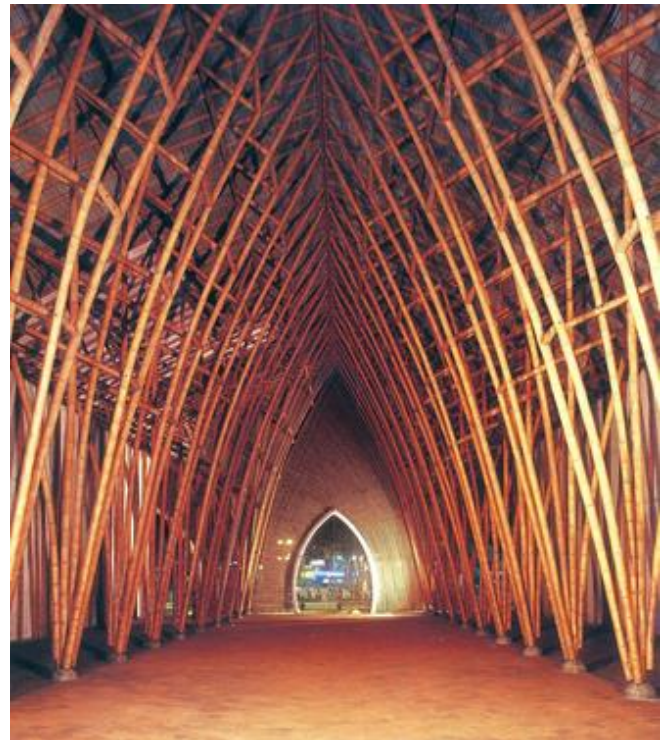


Figura 11. Catedral de Guadua, Pereira, Simón Velez



Figura 12. Estructura de CanyaViva, España

La guadua y el bambú en general, ha sido ampliamente utilizado a lo largo de la historia, teniendo una gran tradición de uso en países como Colombia o China, al ser un material de construcción de fácil acceso y bajo costo.

Es usado tradicionalmente, por ejemplo, en puentes con uniones de cuerdas (Figura 7).

Actualmente, algunas de las construcciones con guaduas más conocidas son las obras del arquitecto colombiano Simón Vélez (Figura 10 y 11) y el arquitecto alemán Jorg Stamm (Figura 9)

En la Figura 12 vemos una estructura formada por cañas ("Arundo Donax") unidas mediante cuerdas compuestas por fibras vegetales.

ESTUDIO DE CASO

La lógica de configuración estructural se plantea en función de la geometría, y con ella, la definición a partir de polígonos regulares. Dicho polígono define tanto la planta de la estructura, como la posición de los pilares, los cuales se hallan situados en los vértices. En la Figura 13 y 14 podemos ver distintas configuraciones según el número de lados del polígono.

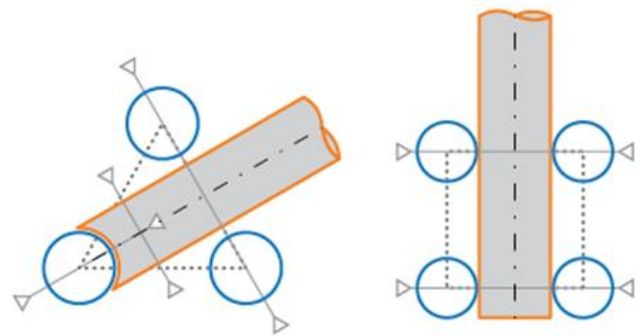


Figura 13. Vista en planta de la disposición triangular y cuadrada de pilares (azul) y vigas (naranja)

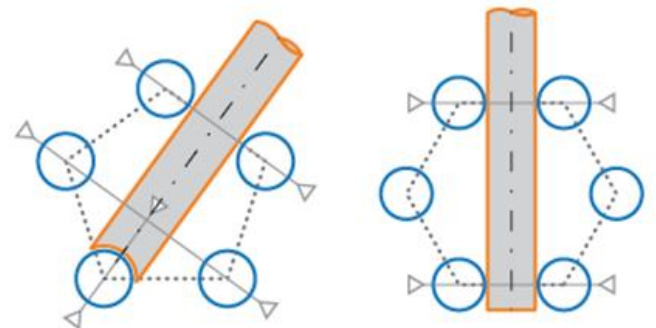


Figura 14. Vista en planta de la disposición pentagonal y hexagonal de pilares

La separación entre los soportes verticales (fijados a los elementos horizontales) provoca un aumento de la inercia del pilar, siendo ésta la equivalente a la inercia del polígono inscrito (línea punteada).

Calcularemos el aumento de la inercia conseguida en el pilar, usando la lógica geométrica aplicada en nuestra estructura, comparándola con el mismo número de elementos estructurales verticales colocados juntos (Figura 15).

Usaremos para el cálculo, vigas y pilares de 10 cm. de diámetro. Siendo $a = 0,11$ m. y $b = 0,2$ m.

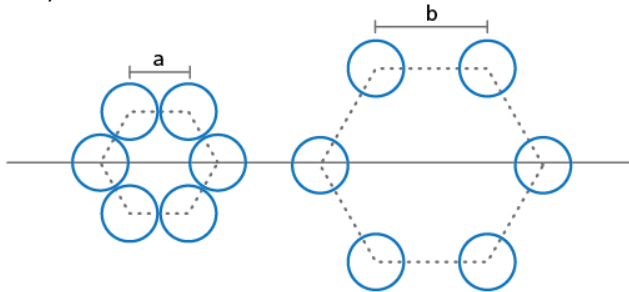


Figura 15. Distribución de los pilares para la comparación de inercias.

Aplicando la ecuación del momento de inercia para un hexágono:

$$I = \frac{5\sqrt{3}}{16} a^4 \quad I = \text{Inercia}, a = \text{lado} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación a los distintos valores numéricos, obtenemos una inercia 11 veces superior a la primera.

El efecto en espiral se consigue mediante dos transformaciones geométricas (Figura 16): la primera es un desplazamiento vertical de la viga, seguida de una rotación hasta colocar la viga perpendicular al lado adyacente del polígono.

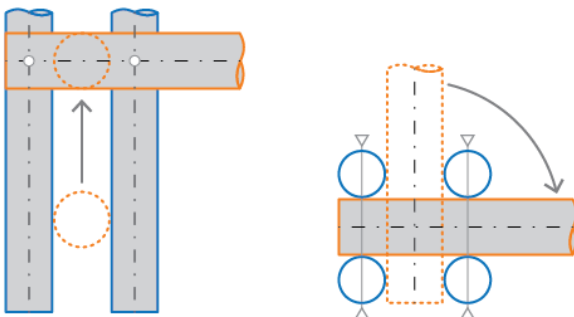


Figura 16. Transformaciones geométricas

Repitiendo estas operaciones conseguimos generar la estructura principal (Figura 17), sobre la que se colocarán los elementos de cobertura (Figura 18).

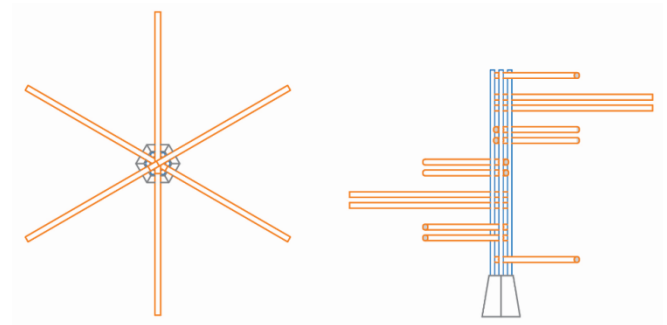


Figura 17. Vista en planta y alzado de los elementos estructurales principales

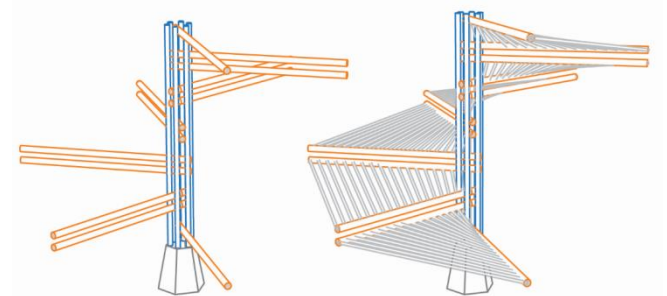


Figura 18. Perspectiva de la estructura principal con los elementos de cobertura

DISEÑO ALGORÍTMICO

Para el desarrollo de la geometría se utiliza el software de diseño paramétrico *Grasshopper*¹. Se desarrolla un algoritmo (Figura 19) dependiente de parámetros como el diámetro de los distintos elementos, número de lados del polígono o la longitud de las vigas. (Figura 20)

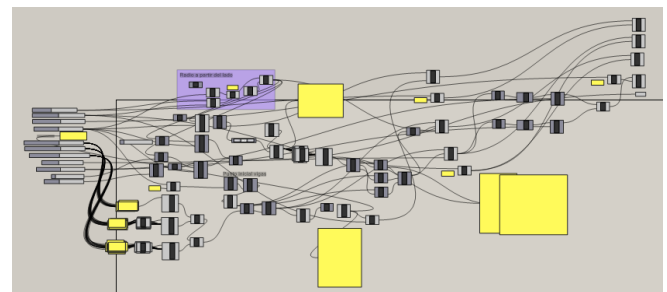


Figura 19. Algoritmo

¹ Software editor gráfico de algoritmos, plug-in del software de modelado 3D basado en NURBS *Rhino*.

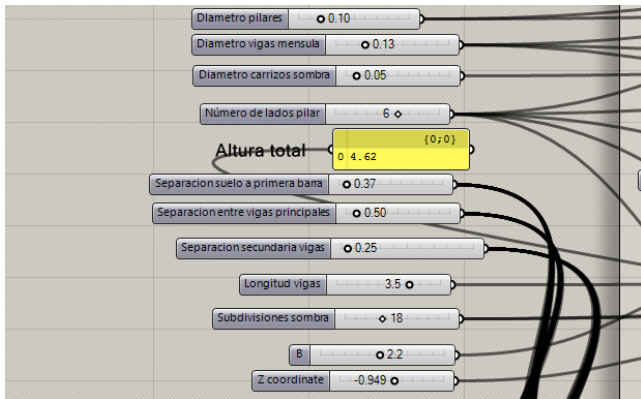


Figura 20. Sliders

Obtenemos un proceso modificable a través de parámetros, por lo que no generamos una geometría estática (usando el ordenador como una mera herramienta de representación) sino que usando la capacidad de computación de la máquina, obtenemos una familia de N soluciones distintas para cada uno de los valores de estos parámetros y sus diferentes combinaciones (Figura 21).

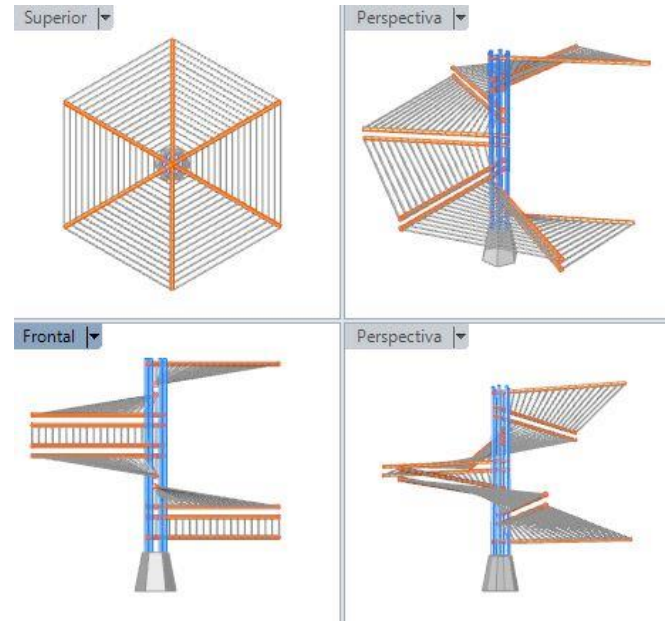
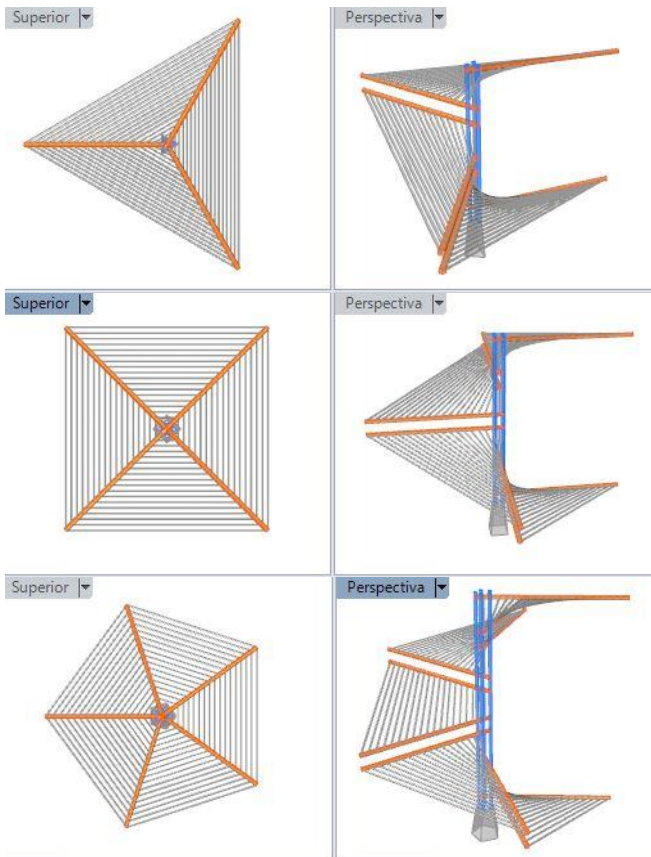


Figura 21. Estructuras resultado de la modificación del parámetro *número de lados del polígono*.



APLICACIÓN DE RESULTADOS

Como primera aproximación a la construcción de la estructura, es necesaria la construcción de un prototipo de menor escala, el cual evidencie los puntos estructurales que implicarán mayor atención (Figura 22).

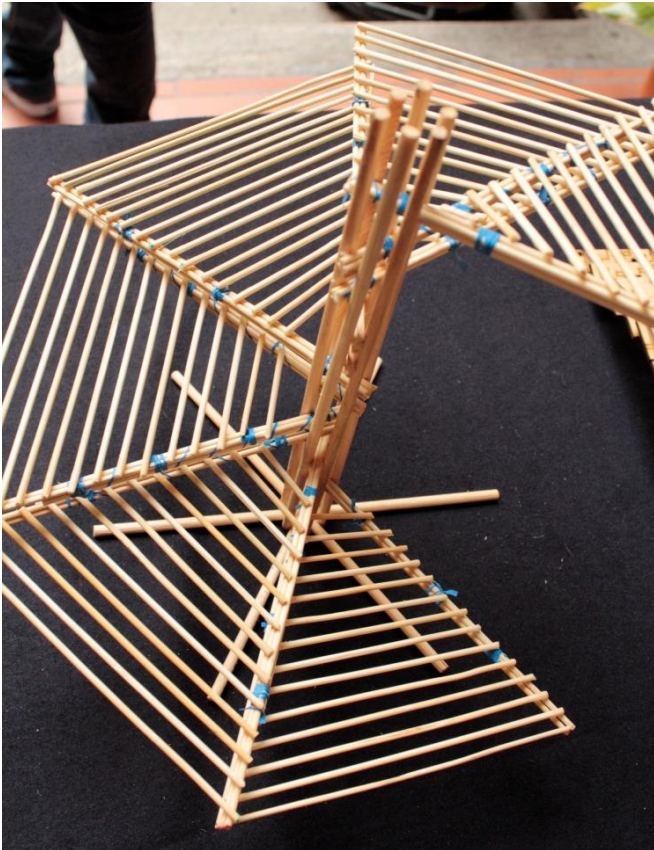


Figura 22. Prototipo a escala

El primer paso hacia la construcción de la estructura tiene que ver con el conocimiento previo de la muda de bambú y de las posibilidades técnicas y ecológicas para su posterior proyección en armonía con el contexto. Este conocimiento sobre el bambú es adquirido en Brasil, optándose por el uso de la especie *Guadua Angustifolia*.

En este caso, dado que la estructura es construida en la ciudad de Oaxaca (México), dentro de un marco académico y parte de un workshop sobre Diseño Paramétrico, se propone la incorporación de un material regional mexicano conocido comúnmente con el nombre

de "carrizo" dada su abundancia y su naturaleza estructural. (Figura 23 y 24)

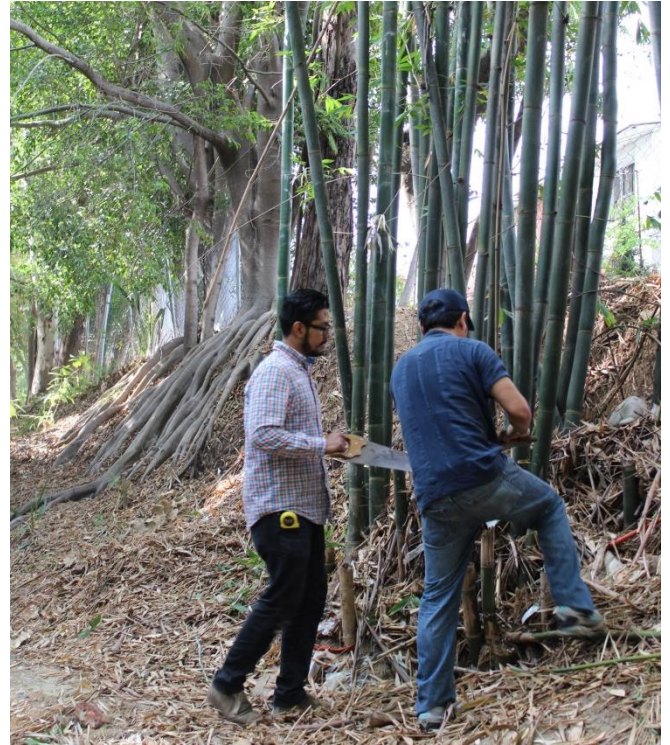


Figura 23. Etapa de recolección del bambú



Figura 24. Carrizo (*Arundo donax*)

Conociendo la lógica estructural del material y teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones del mismo, a partir de un estudio previo de la dimensiones del bambú concluimos que el uso de las uniones por varilla roscada de $\frac{3}{4}$ pulgadas resultaba lo más conveniente.

Para las uniones del bambú con el carrizo optamos por el uso de Mecahilo². La base de la propuesta es la unión entre conocimiento empírico, biológico y técnico ya que el diseño fue fundado a partir de un algoritmo creado mediante diseño generativo, todo esto para llevar a cabo una arquitectura llena de un contenido intrínsecamente sustentable ya sea de forma permanente o efímera.

PROCESO CONSTRUCTIVO

Teniendo en cuenta lo antes descrito, se inicia su construcción con el levantamiento del hexágono base de los colmos o tallos de Bambú. Posteriormente se anclan a la cimentación o en su defecto se sostienen por un andamio y se procede a sujetar los seis elementos verticales entre sí con la varilla roscada y tuercas para su mejor agarre (Figura 25 y 26).



Figura 25. Prueba de unión de los elementos de soporte vertical mediante varilla roscada.



Figura 26. Soportes verticales formando el polígono regular base (hexágono).

Los elementos horizontales se componen de carrizo distribuido de forma escalonada, de acuerdo a los esfuerzos estructurales a los que estarán sometidos, siendo éstos mayores en la base que en los extremos, aligerando de esta forma el peso de la estructura.

Son armados en grupos de tres personas. Cabe destacar el conocimiento para el amarre de los carrizos, entre 15 a 20 componentes unidos con mecahilo usando técnicas de nudos marineros (Figura 27).



Figura 27. Amarre de los carrizos mediante mecahilo y nudos marineros.

² Hilo proveniente del *Henequén*, fibra derivada del *Agave fourcroydes*.

Se arman las estructuras horizontales a los pilares mediante varilla roscada y se aseguran con mecahilo (Figura 28 y 29).

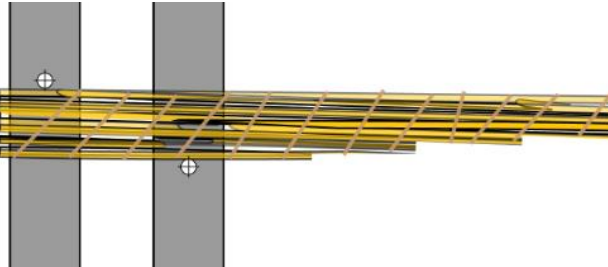


Figura 28. Detalle de la posición de las varillas



Figura 29. Unión entre soportes verticales y horizontales

Dadas las dimensiones de los segmentos y por la espiral que describe la geometría, es posible su construcción en grupos de 2 a 3 personas de manera simultánea (Figura 30).

Asimismo, las superficies de cobertura entre los elementos horizontales se forman con carrizo, sujetos a estos mediante amarres con mecahilo.

Debido a la geometría de la estructura, es posible el trabajo simultáneo de varios grupos de personas en la fase de cobertura (Figura 31).



Figura 30. Estructura principal sin elementos de cobertura.



Figura 31. Trabajo simultáneo de varios grupos en la fase de amarre de los carrizos de cobertura.

El proceso constructivo completo es llevado a cabo en dos días. Una vez la estructura completa comprobamos que es innecesario el soporte inferior para la estabilidad de la misma. (Figura 32-33-34-35)



Figura 32. Vista superior de la estructura finalizada



Figura 33. Imagen en la que se aprecia el hexágono formado por la sombra



Figura 34. Uniones de los elementos estructurales verticales con los horizontales

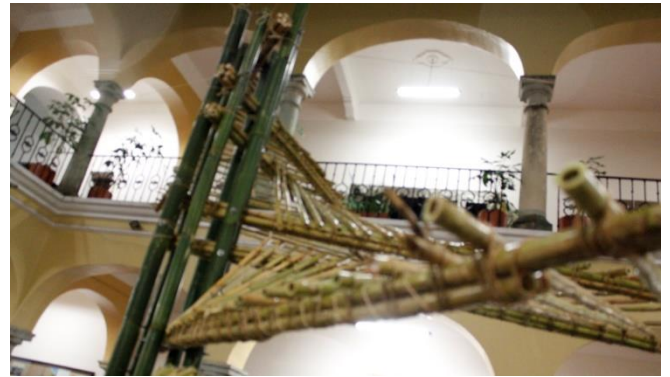


Figura 35. Amarres de los elementos de cobertura a la estructura principal

BENEFICIOS MEDIOAMBIENTALES

Hemos de tener en cuenta el hecho de usar bambú como principal material estructural, siendo éste un material 100% renovable, con una enorme cantidad de aportaciones al medio ambiente.

Pese a ser reconocido por sus cualidades como elemento estructural dentro del contexto mexicano, el carrizo aún no es considerado como un material constructivo notable dentro de las múltiples opciones del mercado, dejando de lado sus innumerables beneficios y viabilidad. Lo cual implica la continua lucha ante tales preconceptos.

Por otra parte, el mecahilo retoma la tradición del llamado "oro verde" en el siglo XIX, y es por todas sus características que se intenta rescatar, ya que su uso cuenta con innumerables beneficios ambientales.

La construcción que esta arquitectura deja es ínfima en lo que respecta a la huella de carbono, ya que todo el proceso constructivo es físico y no conlleva gastos energéticos por procesos químicos de la materia, a parte del uso de la varilla roscada.

Otro beneficio intrínseco de la espiral es que el 95% de los desechos y de la estructura misma son totalmente orgánicos.

CONCLUSIONES

A modo de conclusión, tras finalizado el proceso de concreción de la idea original, queda evidenciado las múltiples posibilidades que ofrecen las herramientas de diseño paramétrico aplicadas al campo de las estructuras. Sin las cuales la fiel representación de la misma hubiese sido muy limitada.

Se reafirma que el ordenador no es una mera herramienta de representación, sino que el diseñador ahora usa la máquina dentro del mismo proceso de diseño, donde se pueden encontrar soluciones que no se buscaban, debido a la naturaleza cambiante del proceso algorítmico o generativo.

El caso de aplicación expuesto anteriormente cumple con los objetivos enunciados inicialmente: la adaptación a las posibilidades y limitaciones del material específico, el cual responde a su contexto local, y la simplicidad pero eficiencia del diseño estructural de una geometría de tal complejidad; desvinculando de esa manera al diseño paramétrico de la construcción *High-Tech*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KHABAZI, Z. (2012). "Generative Algorithms (using Grasshopper)". Online Publication: www.Grasshopper3D.com.

HELSEL, M., MENGUES, A., and WEINSTOCK, M. (2004). "Emergence: Morphogenetic Design Strategies". London. AD Wiley.

MEREDITH, M., and SASAKI, M. (2008). "From control to design: parametric, algorithmic architecture". Barcelona. New York: Actar-D.

HIDALGO LÓPEZ, O. (1981). "Manual de construcción con bambú". Bogotá. Editores Técnicos Colombianos.

PEREIRA, M. A., and BERALDO, A. L. (2010). "Bambu de corpo e alma". Bauru. Canal 6.

DUNKELBERG, K. (1992). "Bamboo as a building material". Stuttgart. Karl Kramer Verlag.

OBERMANN, T. (2003). "Bambu: recurso sostenible para estructuras espaciales. Colombia. Universidad Nacional de Colombia

D.GRILLO, A.C. (2005). "La arquitectura y la naturaleza compleja: Arquitectura, Ciencia y Mímesis a finales del Siglo XX". Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña