



*4° Encuentro de Jóvenes Investigadores – CONACYT
11° Coloquio de Jóvenes Talentos en la Investigación
Acapulco, Guerrero 22, 23 y 24 de septiembre 2016
Memorias*

Arquitectura sustentable con definición de patrones de comportamiento estructural en materiales y sistemas estructurales actuales.

Alejandro Flores Nicolás (Becario)
Universidad Autónoma de Guerrero
Unidad Académica de Arquitectura y Urbanismo
Programa de Verano AMC
alex_aldebarante24@hotmail.com
Área en la que participa: VII Ingenierías

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas (Asesor)
Investigador Responsable del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional Autónoma de México.
jgos@unam.mx

Resumen

El presente proyecto constituye la aplicación de la geometría estructural al diseño arquitectónico, Tomando el estudio de las curvas generadas a partir de una superficie cónica; como resultado de este, se obtiene la circunferencia, la elipse, la parábola, la hipérbola, que generan elementos estructurales. También se analizó la curva catenaria, es la forma ideal para que un arco se mantenga en equilibrio.

Las cubiertas ligeras de cascarones reticulados son producto de un conjunto de curvas anteriormente mencionadas, este elemento lo empleaba el arquitecto Antoni Gaudí. Precedentemente se construían con materiales como: el concreto y el acero de refuerzo, con un peralte mínimo menor de 10 cm, lo que generaba una losa curva, y haciendo la estructura más ligera. En este proyecto se aplica el fomento de uso de nuevos materiales sustentables aplicados para la construcción de cascarones reticulados, y amigables al medio ambiente, incorporando el bambú como material estructural y también sustituyendo el concreto de refuerzo con membrana

textil, para que la estructura sea más ligera, finalmente haciendo un modelo en 3d, con programas de modelación BIM.

Palabras Clave: Curva, Catenaria, Nodo, Cascaron Reticulado, Membrana textil.

Introducción

La arquitectura sustentable es un concepto complejo y moderno que trata de incorporar el equilibrio con el medio ambiente, tratando de estudiar métodos que intervengan para mejorar las construcciones y el diseño. La estructura ha sido un elemento importante en la arquitectura y la ingeniería, ya que puede definir la mayoría de los espacios de una construcción de acuerdo al diseño, existen varias tipos de elección sobre la estructura en la construcción y conforme los años han pasado esta ha ido evolucionando hasta nuestros días, teniendo los métodos más modernos para lograr cosas realmente increíbles que el ser humano ha imaginado.

El complejo de las estructuras se estudia a partir de su geometría, una forma curva se resuelve por medio de armaduras de acero, u otro material. Un ejemplo de ello son los cascarones reticulados, un estudio de este elemento lo hizo el arquitecto Antoni Gaudí, lo cual empleo formas curvas equilibradas (las catenarias) a las estructuras buscando prácticamente el equilibrio a través de la forma, por su gran sentido y soluciones técnicas con la geometría, y los volúmenes, creando grandes edificios estéticos

En este proyecto se diseñará un cascaron reticular, con materiales sustentables y de bajo costo, se propondrá propuestas de diseño y con ayuda de programas en modelado BIM (Building Information Modeling por sus siglas en ingles) en 3D, permitirá tener un noción en tiempo virtual de la geometría de la estructura, junto con la propiedades de los elementos que conformaran al cascaron reticulado, y así asegurar la eficiencia en los procesos y la entrega final de un producto de calidad, además detectar pequeños problemas y o beneficios a la estructura.

Actualmente se diseñan edificaciones con formas curvas, pero los materiales convencionales como es el acero, y el concreto, generan que la estructura y edificio sean más pesados, lo cual en la ciudad de México es una zona altamente sísmica, y una estructura pesada y con una forma curva es muy vulnerable, por eso se trata de encontrar nuevas formas de sistemas o elementos constructivos para las formas curvas, con características que sean sustentables y amigables con el medio ambiente. Los materiales que se proponen son el bambú y la membrana textil para la cubierta de la estructura.

El Bambú hoy en día material moderno sustentable de bajo costo, y ha sido utilizado en estructuras convencionales, además de tener una buena resistencia a las fuerzas que se generan, se emplea en este proyecto como estructura del cascarón reticulado.

Materiales y Métodos

El inicio se realizó un estudio de las formas de curvas cónicas geométricas, lo cual se obtienen al seleccionar un cono de revolución con un plano secante. Un cono de revolución es un cuerpo geométrico que puede considerarse engendrado por una línea recta denominada generatriz, que se mueve fija en un punto (centro de generación o vértice del cono), alrededor de un eje y con una dirección circular denominada directriz. Ver figura 1.

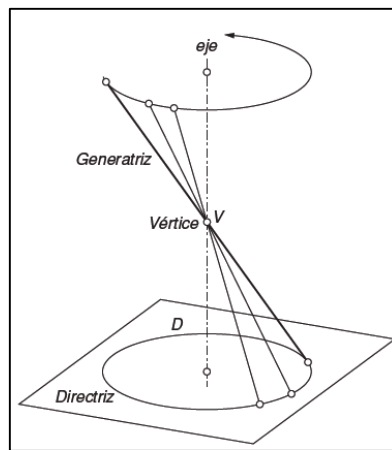


Figura.1. Ejemplo de Cono Geométrico, a través de generatriz y directriz.

Después de un corte al cono geométrico se obtiene diferentes tipos de curvas, y son figuras cónicas como la elipse, la parábola y la hipérbola que a continuación se describen, Ver figura 2.

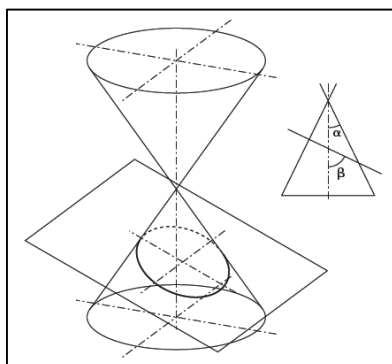


Figura. 2 Elipse.

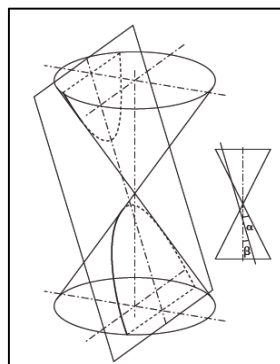


Figura. 2.1 Hipérbola

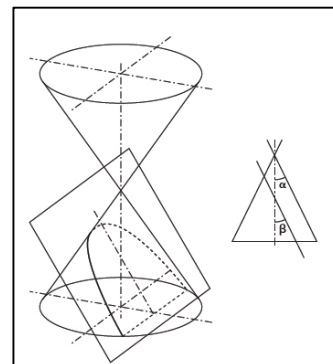


Figura. 2.2 Parábola

Ade

más se estudió otra curva geométrica distinta a las tres ya mencionada, la Curva Catenaria, surge de la forma que indica una cadena o una cuerda de densidad uniforme sujeta por sus dos extremos y sometida únicamente a la fuerza de la gravedad.

La catenaria es muy utilizada en la arquitectura, por su forma geométrica y en este proyecto de diseño de un cascaron reticulado se empleara dicha curva.

Las fuerzas que se generan en una curva catenaria, son la tracción y compresión, a consecuencia de las fuerzas generadas por la gravedad. En la Figura 3. Se puede percibir las fuerzas actuantes, o en su caso por otro tipo de fuerzas.

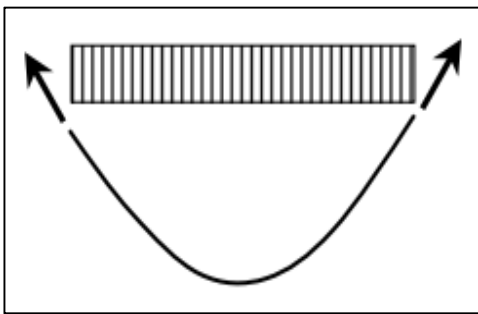


Figura. 3. Catenaria a fuerza de Tracción.

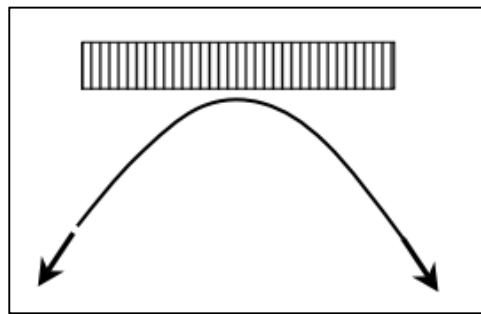


Figura. 3.1 Catenaria a fuerza de compresión.

Primeramente para el diseño de las dimensiones y el espacio a cubrir de la Catenaria, se utilizó la fórmula de la catenaria para calcular la altura con un espacio propuesto de 11.60 metros.

Para la forma de estructura curva se utilizará material sustentable como el bambú de nombre Guadua Angustifolia, este material estudiado en la modernidad destaca por sus propiedades estructurales entre otras su relación a la resistencia y el peso que es menor a la mayoría de las maderas existentes en la utilización de la industria de la construcción, llegando incluso a compararse con el acero y fibras de alta tecnología. Ver figura 4.



Figura. 4. Bambú Guadua Angustifolia

El bambú tiene características necesarias para sustituir al acero en este diseño de cascaron reticulado, según estudios de Simón Vélez, (2006). La Guadua, pueden crecer diámetros máximos hasta 25 cm, entre los 3 y 6 años de producción, alcanzando su máxima resistencia y llegando a dimensiones promedio. El diseño busca que la estructura sea estética además de ser ligero en peso, no sea bastante robusto con diámetros mayores, así que el diámetro óptimo para este diseño es de 6 cm aproximadamente. Con este material se proyecta el diseño del cascaron reticulado, la longitud propuesta del bambú será a cada unidad de metro, ya que tendrá más resistencia a fuerzas externas. Para el recubrimiento de él cascaron reticulado, se propone Membranas textiles, sustituyendo a los materiales convencionales de cubiertas, como lo es el acero y el concreto reforzado.

Las membranas textiles son estructuras tensionados que permiten diseños de gran variedad y belleza y pueden utilizarse como cubiertas y cerramientos en estadios, coliseos, parques, centros comerciales, aeropuertos, plazoletas de comidas, terminales de transporte, instalaciones deportivas y centros recreativos. Muy utilizados en la actualidad, porque son muy fáciles de cubrir grandes espacios de diferentes formas, curvas o rectas, además por su ligereza y gran facilidad de colocación, de acuerdo a Edilberto Castro (2014). Las membranas arquitectónicas son completamente diferentes a cualquier otra solución de cubiertas, tanto técnica como funcionalmente. A partir de cuatro formas básicas plana, cóncava, convexa y la parábola hiperbólica se obtienen gran cantidad de configuraciones geométricas, a las cuales se agregan características físicas poco comunes para lograr estructuras únicas. En un catálogo se verifico los tipos de membranas de las cuales presentaban características como resistencia, la porosidad entre otro. Como se muestra en la figura 5. Lo cual nos ayudó a elegir cual membrana sería la indicada para el diseño.



Figura. 5. Catálogo de Membrana

El nodo se propuso material de polipropileno, este material químico es uno de los más utilizados en la actualidad, tiene características de resistencia y ligereza, por lo cual es óptimo en la fabricación y propuesta del nodo. El diseño del nodo se realizó con 10 cm de diámetro para que la estructura visualmente sea estética, y que el nodo no sea tan grande con respecto a las barras de bambú, además se propuso aberturas en el nodo, como tipo orejas, se pensó para que las barras de bambú al momento de que conecten con los nodos este sea dinámico. Las orejas del nodo cumplen una función elemental en la estructura, ya que puede disminuir las fuerzas de tracción y tensión. Muchas tenso estructuras en construcciones actuales, las barras se conectan a nodos fijos, esto para evitar las fuerzas de tracción. Pero en este diseño se innovará también el tipo de nodo, resolviendo los problemas que se generan con las fuerzas de tracción. Se realizó un modelado en 3D del nodo con las dimensiones propuestas, además de las aberturas para las conexiones dinámicas. Del modelado y el diseño del nodo, se empezó a la fabricación de un prototipo a escala, teniendo en cuenta que los materiales a utilizar serian diferentes al prototipo. Ver figura 6.



Figura. 6. Realización de Prototipo de Nodo.

Con el material que se contaba en la institución se prosiguió a la construcción del Nodo, cortando la figura del prototipo, y plasmando en una cartulina gris de espesor de 4 mm, se comenzó con la maqueta del nodo.

También en la institución, se contaba con equipo de impresora en 3D. Y con ayuda de los Arquitectos colaboradores del Laboratorio, se pudo lograr imprimir la maqueta del Nodo en 3D. Ver figura 7.

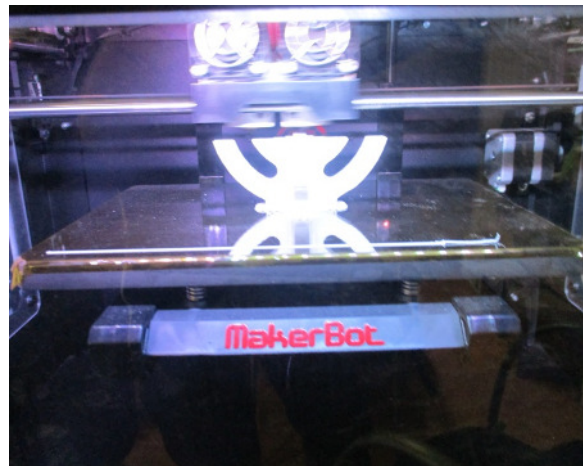


Figura. 7. Impresión del Nodo en 3D

La tecnología actualmente está revolucionando, y en la arquitectura se ha beneficiado, en procesos tan largos como los propios, poder ofrecer ya sea en realidad virtual o en maqueta, es siempre útil para mantener el foco en los conceptos fundamentales de un proyecto. Así que se construyeron 2 maquetas del nodo, uno de forma manual y en otro en la impresora en 3D, que tiene su funcionamiento a través de modelados BIM.

En la impresora en 3D el tiempo de construcción fue mucho menor al de construcción de un nodo a mano, por lo cual se empezó a construir el nodo mucho antes de que este modelo se enviara a imprimir, para que los dos prototipos quedaran en el mismo tiempo para su uso. El objetivo de la construcción de este prototipo era saber cómo se percibiría la conexión del nodo y la barra de bambú en tiempo real.

Resultados

Los resultados fue un diseño para la construcción del cascaron reticulado construido con 224 barras de bambú Ver figura 8, de las cuales 196 barras son regulares (de 1 metro de nodo a nodo),

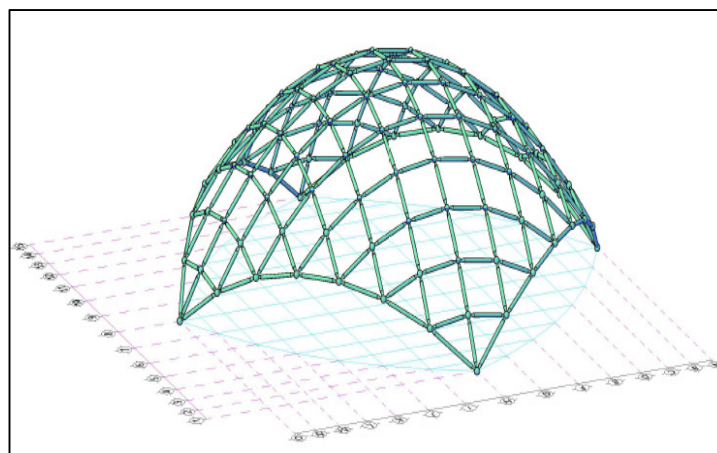


Figura. 8. Modelado BIM en 3D, del cascaron reticulado final.

y 48 barras irregulares (de borde), la especie de bambú que se empleará es *Guadua Angustifolia*, de un diámetro aproximado de 6 cm, con espesor de la pared aproximado de 1 cm, y un peso aproximado de 1cm 0.0114 kg. Haciendo la estructura ligera y de gran resistencia.

Los ángulos con el cual está construido el cascaron se observan en la siguiente tabla con el estudio de un cuadrante del elemento. Ver tabla 1.

Nodo	Conexión 1		Conexión 2		Conexión 3		Conexión 4	
A8	A8-B8	57°	A8-B9	33°	A8-B7	33°		
B7	B7-C6	22°	B7-C7	53°	B7-B8	7°	B7-A8	-33°
B8	B8-C8	53°	B8-B9	-7°	B8-A8	-57°	B8-B7	-7°
B9	B9-C9		B9-C10		B9-A8		B9-B8	
C6	C6-D6	47°	C6-C7	20°	C6-B7	-22°	C6-D5	11°
C7	C7-D7	47°	C7-C8	7°	C7-B7	-53°	C7-C6	-20°
C8	C8-D8	47°	C8-C9	-7°	C8-B8	-53°	C8-C7	-7°
C9	C9-D9		C9-C10		C9-B9		C9-C8	
C10	C10-D10		C10-D11		C10-B9		C10-C9	
D5	D5-E5	40°	D5-D6	31°	D5-C6	-11°	D5-E4	0°
D6	D6-E6	40°	D6-D7	20°	D6-C6	-47°	D6-D5	-31°
D7	D7-E7	40°	D7-D8	7°	D7-C7	-47°	D7-D6	-20°
D8	D8-E8	40°	D8-D9	-7°	D8-C8	-47°	D8-D7	-7°
D9	D9-E9		D9-D10		D9-C9		D9-D8	
D10	D10-E10		D10-D11		D10-C10		D10-D9	
D11	D11-E11		D11-E12		D11-C10		D11-D10	

Tabla 1. Se muestra los ángulos con los que las barras de Bambú se conectan al nodo. Fuente: Elaboración

En la tabla anterior se puede observar que algunos ángulos positivos y negativos, ya que el elemento es de forma curva y se presentan estos ángulos. Por lo que no afecta en nada al cascaron reticulado, solo se muestra en que cuadrante de un plano cartesiano se encuentra la dirección de la barra conectado al nodo.

El Angulo mayor que se muestra en la tabla es de 57 grados y se presenta justamente donde se apoyará el cascaron reticulado, a consecuencia de lo complicado del Angulo, las barras de bambú no son regulares y es por eso que se tiene diferentes dimensiones solo en los extremos. Este diseño cubrirá un espacio de 11.6 metros de diámetro y una altura de 4.66 metros.

El nodo de la estructura se propuso de material de polipropileno, como se mencionó anteriormente, dentro del diseño se empleará 113 nodos de los cuales; 85 nodos son regulares, y 28 nodos son irregulares. La característica principal del nodo es que tendrá la función de ser dinámico con las fuerzas que se generen.

Posteriormente con estos datos se modeló en programación BIM, y finalmente se imprimió en la impresora en 3D, también se realizó una maqueta manual del nodo como se mencionó anteriormente, para ver la estructura en tiempo real. Como se muestra en la figura 9.

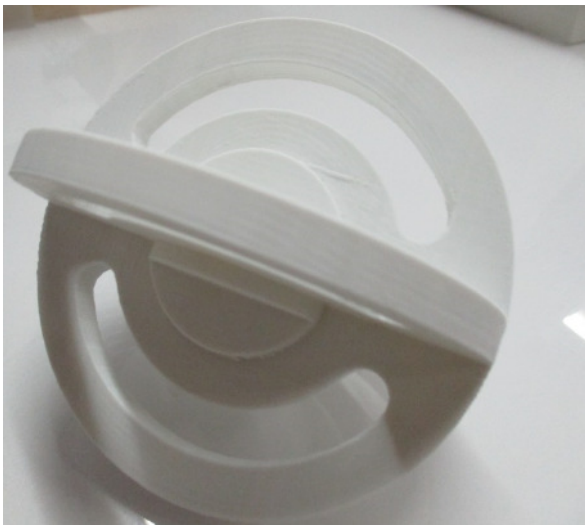


Figura. 9. Maqueta del Nodo, Impreso en 3D.



Figura. 9.1 Maqueta del Nodo, realizado manualmente.

La realización de estos nodos, se observó que al compararlo con la pieza de un metro de bambú, de diámetro 6 cm aproximadamente, se notó fuera de proporción, por lo cual se propuso cambiar el diámetro del nodo de 10 cm inicialmente a 12 cm.

Discusión y conclusiones

Durante el diseño se observó a detalle la propuesta de nodo, ya que todas las fuerzas generadas de tracción, se dirigían directamente al punto crítico este elemento que son los aros, que sostienen la barra de bambú, Se propuso cambiar las dimensiones y espesores para el soporte de las fuerzas.

Pequeños problemas con la escala real del bambú y el nodo, ya que estéticamente el nodo estaba pequeño en comparación con la barra de bambú, lo que afectaba la imagen de la estructura.

Por eso se pensó en aumentar el elemento a 12 cm, para que obtuviera una proporción adecuada, y todo el elemento del cascaron reticulado estéticamente se apreciara mejor.

Al principio se pensó en cambiar la dimensión de todo el nodo de 10 a 12 cm, pero finalmente se obtuvo la idea de que solamente se aumentara esos 2 cm, en el punto del nodo donde había más fuerzas críticas de tracción, lo cuales son los aros, o las orejas, aumentando .5 cm en los cuatro extremos, con esta solución se presente que las fuerzas que se generen en la estructura, principalmente en esa región, tenga mayor espesor y con esto puede soportar dichas fuerzas. Así que finalmente el diseño quedo con dimensiones del nodo de 12 cm, la barra de bambú quedó de un metro de longitud.

También se pensó que las conexiones del bambú al nodo, se expresó el ligado por medio de cables de acero a tensión, como se muestra en la figura 10. El cable de acero ayuda a la estructura en la flexibilidad y a lo dinámico de la estructura distribuyendo mejor las fuerzas que se generen en el elemento por la gravedad y el peso de los materiales.



Figura. 10. Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas, explicando el beneficio del cable de acero en la Nodo.

Además el cable de acero surgió un pequeño problema y es que se imaginó que al momento que el cable se mueva, con el resultados de las fuerzas del viento, entre otros puede generar fricción en el nodo, y por lo tanto dañarlo, afectando gran parte de la estructura e incluso todo el conjunto del elemento.

Así que después de un análisis para resolver el problema de fricción por parte del cable de acero, se pensó en colocar una goma que redujera la fricción, provocado en el elemento. Esta propuesta fue muy interesante ya que la goma absorbe las fuerzas o el roce del cable de acero con el nodo. La conclusión al término de mi participación en este verano, el cascarón reticulado que se diseñó aportará mucho a la geometría estructural y en especial a la arquitectura, ya que se puede lograr nuevos métodos que intervengan en grandes espacios

Agradecimientos

Agradezco a la Academia Mexicana de Ciencias, por permitirme participar en esta XXVI edición de verano de investigación 2016, lo cual adquirí nuevos conocimientos para mi formación y preparación académica, así como la Universidad Autónoma de Guerrero, por apoyarme económicamente en este verano, ya que no tuve la fortuna de salir beneficiario con la beca de este programa, también en orientarme en los trámites de documentos para este verano científico.

De la misma manera agradezco al Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas, por permitirme ser parte de su equipo de investigación, además de aprender de sus experiencias y conocimientos que lo cual me transmitió, y de consejos que nos sugirió por su experiencia que él ha adquirido. Y a todo el equipo de trabajo del laboratorio de estructuras de la UNAM, conformado por Estudiantes de Arquitectura y Maestría e Ingenieros, por su ayuda en las dudas que surgieron en esta estancia del verano. Y además de guiarnos en algunos trabajos que se presentaba, además de facilitarnos completamente los materiales que se utilizaron para la construcción de las maquetas.

También a la Universidad Nacional Autónoma de México, y en especial al laboratorio de estructuras de la UNAM, por permitirme el uso de las instalaciones, la realización y término satisfactorio de mi verano científico.

Referencias

GANEM ALCANTARA, NATHAN, (2010) White Sky Textil Architecture, Ganem Construcción. Lugar. Miguel Hidalgo, México D.F. Pág. 190.

HIDALGO LOPEZ, OSCAR. (2003) Bamboo The Gift Of The Gods. Ed. LTDA. Lugar. Bogotá, Colombia. Pág. 275.

SANCHEZ VIDIELLA, ÁLEX. (2012) *Materiales de Arquitectura Bambú*. Ed. Lexus editores, Lugar. Barcelona, España. Pág. 376.

SALAS DELGADO, EDUARDO, (2006) *Actualidad y Futuro de la Arquitectura de Bambú en Colombia*, Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Pág. 137.