

UNIONES DINÁMICAS PARA SISTEMAS DE FÁCIL MONTAJE CON ELEMENTOS TUBULARES, BÓVEDAS Y CÚPULAS

DYNAMIC JOINT FOR EASY ASSEMBLY SYSTEMS WITH TUBULAR ELEMENTS, VAULT AND DOME

Coca, Sindy ⁽¹⁾*; Lozano, Jorge ⁽²⁾; Linares, Gabriel⁽³⁾

⁽¹⁾ Arquitecta/Magíster en Construcción. Facultad de artes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽²⁾ Arquitecto/Magíster en Construcción/Especialista en patología de la edificación. Facultad de artes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽³⁾ Ingeniero Mecánico/ Especialista en Gestión de Proyectos, Universidad Nacional de Colombia/ UNAD. Bogotá, Colombia.

* Contacto: smcocan@unal.edu.co

CÓDIGO: 4610941

Resumen

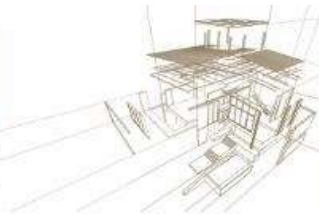
La investigación desarrolló el diseño de uniones dinámicas para un sistema estructural y constructivo en elementos tubulares (dentro de estos la posibilidad de usar madera rolliza y bambú). El sistema se basó en la morfología estructural de sistemas de superficie activa, más específicamente plegaduras antiprismáticas, convirtiendo el sistema de superficie activa a sistema de vector activo, con el fin de reemplazar los pliegues por elementos tubulares. Durante el proceso se realizó una búsqueda de sistemas y uniones similares, analizando las ventajas y desventajas de cada uno. Se propuso un diseño en donde se analizó la movilidad del sistema en general y de las uniones, utilizando para ello simulaciones por computador y modelos a escala. Obteniendo como resultado las uniones dinámicas que facilitan el proceso constructivo de todo el sistema y los valores dimensionales de la estructura relacionados con las dimensiones de los elementos tubulares, el sistema se puede pre-armar en el suelo y con fuerzas laterales lograr su configuración espacial final, él está conformado por elementos prefabricados.

Palabras-clave: Sistemas de superficie activa, Sistemas de vector activo, Conexiones dinámicas, Estructura plegable.

Abstract

The research development design to dynamic joints for a construction and structural system by tubular elements (in this possibilities are the wood and bamboo). The system based on the structural morphology of surface active systems, specifically folded antiprismatic surface, we converted the folds to tubular elements. In this process was made a search of similar systems and joints, analyzing the advantages and disadvantages of each. We proposed a design where the mobility of the system in general and of the unions was analyzed, from this we used a computer simulations, scale models. Got the results the dynamic joint that doing easy constructive process of the entire structure and we got dimensional values that related with the dimensions of tubular elements, The system can be assembled in the floor and lateral forces for give the finally spatial configuration. The systems have prefabricate elements.

Keywords: Surface active systems, Vector active systems, Dynamic connections, Foldable structure.



1. INTRODUCCIÓN

Se plantea diseñar un sistema constructivo con base en la morfología y geometría de algunos sistemas de superficie activa, específicamente plegaduras. La estructura debería ser dinámica, de fácil construcción y ser versátil en su uso y materiales. Permitiéndose ser usada como estructura temporal o permanente, está conformada por elementos tubulares y uniones dinámicas que se deberían realizar de forma prefabricada antes del montaje de la estructura.

Se tuvo como objetivo general en el proyecto desarrollar un sistema de uniones dinámicas para elementos tubulares basándose en la morfología estructural de las plegaduras prismáticas para aplicaciones estructurales - arquitectónicas.

Como metodología para cumplir el objetivo general se realizaron cronológicamente las siguientes actividades:

- Se analizaron los sistemas de superficie activa, vector activo, conceptos básicos del movimiento y proyectos pertinentes con el tema, para determinar conceptos y condiciones que se tuvieron en cuenta al momento de diseñar las uniones.
- Se analizaron y evaluaron las plegaduras y sus movimientos para determinar los requerimientos de las uniones y su aplicación arquitectónica.
- Se identificaron los movimientos en los distintos nudos y el funcionamiento cinemático general de la estructura mediante, maquetas y prototipos.
- Se diseñaron, modelaron y simularon tridimensionalmente las uniones para determinar los ensambles de los elementos tubulares y los movimientos en los distintos nudos, y dependiendo del comportamiento en la simulación se realizaron ajustes en los diseños.
- Se realizaron prototipos a escala con las uniones diseñadas para la comprobación de la estabilidad y movilidad del sistema, en las comprobación de los prototipos se encontraron algunos inconvenientes y con base en ellos se hicieron ajustes a los modelos y diseños.

Finalmente se ajustaron las uniones dinámicas en el material final y con las dimensiones para la estructura prototipo 1:1 del cual se hicieron los planos pero no se realizó.

El sistema constructivo actualmente se encuentra en proceso de Patente de invención.

1.1. Antecedentes

En la búsqueda de un sistema de fácil y rápida construcción surgió plantear el un sistema con uniones dinámicas que pudiera armarse en el suelo y luego con fuerzas laterales se pudiera izar, para esto tomamos como base los sistemas de superficie activa y se buscó transformar sus pliegues en elementos tubulares para convertirlo en un sistema de vector activo (Figura 1).

El sistema se diseñó adaptable a diversos factores arquitectónicos, técnicos y estructurales. El sistema puede ser usado como equipamientos culturales, deportivos, de acopio, de salud, educativos, viviendas de emergencia ya sea en zonas rurales o urbanas. Beneficiando a diferentes comunidades que tengan dichas necesidades. Sus barras pueden ser en diferentes materiales tales como: madera rolliza, guadua, tubos de cartón metálicos tubulares.

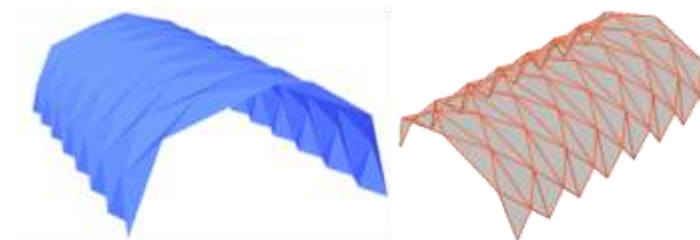


Figura 1: Bóveda hexagonal de 8 elementos por tramo en sistema de superficie activa (a la izquierda) y en sistema de vector activo (a la derecha).

1.2. Conceptos generales

En la revisión de proyectos previos se En el planteamiento del proyecto arquitectónico, se tomaron como base dos de los sistemas estructurales propuestos por Engel (2001) sistemas de vector activo y sistemas de superficie activa.

Los elementos cortos, la triangulación, los nudos articulados, la carga aplicada en los nudos, el uso de barras con trabajo estructural a compresión o tracción, es decir, elementos sometidos únicamente a esfuerzos axiales, son las principales características de los sistemas estructurales de vector activo.

Mientras que, por su parte, los sistemas estructurales de superficie activa son presentan continuidad de superficie, conformación de tímpanos, rigidización de bordes, aumento de pliegues, intersección de superficies.

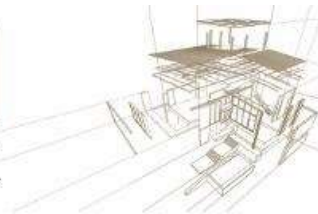
En esta propuesta, se plantea tomar como base la morfología de los sistemas estructurales de superficie activa, reemplazando los pliegues o aristas por barras que respondan a los esfuerzos de compresión y tracción, convirtiéndolos, así, en sistemas estructurales de vector activo que cumplen con las características del sistema, como se aprecia en la Figura 1.

En el proceso de revisión de prototipos e investigaciones con planteamientos similares, se destaca el desarrollo de un sistema de refugio móvil plegable en el que se diseñaron las uniones para facilitar su armado y responder a la movilidad del sistema (De Temmerman, 2006). Al analizar su diseño, se observó que se utilizan dos barras para reemplazar los pliegues verticales, para lo cual, con el fin de mejorar su desempeño y lograr una economía de material, se eliminó una de las barras por pliegue y se logró desarrollar una fórmula para calcular el ángulo de pliegue, el cual se tomó como base para hallar otros parámetros en el planteamiento de la estructura.

La unión desarrollada está compuesta por seis elementos unidos por medio de bisagras, los cuales tienen los ángulos necesarios para generar y mantener la forma, dependiendo de la estructura a construir.

Con respecto a los métodos de unión de las barras, se analizaron algunas uniones estáticas en sistemas tubulares, en los que se probaron diferentes soluciones de ensamble por medio de pasadores, tornillos, soldadura, atornillando las barras o introduciéndose en ranuras. De donde se pudo establecer que el mecanismo más eficiente, por facilidad y funcionalidad, es el ensamble con tornillos y pasadores.

1.3. Sistemas de superficie activa



Los sistemas estructurales de superficie activa se subdividen en plegaduras y cáscaras. Las plegaduras son superficies continuas compuesta por pliegues rectos que otorgan la resistencia y rigidez al sistema estructural, a diferencia de las cáscaras, que son superficies curvas que pueden ser clásicas, sinclásticas o anticlásticas.

Para realizar el cambio de sistema estructural de superficie activa a sistema estructural de vector activo, los pliegues se reemplazan por barras, lo que hace necesario diseñar uniones que articulen y vinculen las barras entre sí para dar unidad, estabilidad y funcionamiento cinemático al sistema.

Así, para determinar los comportamientos y dimensionamientos de la estructura dinámica y sus diferentes elementos planteados, se debe tener en cuenta varios aspectos desarrollados a continuación.

1.3.1. Análisis geométrico

Hay dos características principales en el patrón de la geometría de las plegaduras: el trazado y el comportamiento de los pliegues (valles y montañas).

El trazado es el desarrollo de las plegaduras sobre una superficie horizontal. Las líneas que se trazan en dicha superficie son los pliegues que luego van a conformar la plegadura.

La mayoría de las plegaduras son desarrollables y los trazados varían dependiendo del tipo de plegadura. En la Tabla 1 se presentan los trazados de cada uno de los tipos de plegaduras y las principales características de los pliegues.

Al evaluar estos tipos de plegaduras, se puede ver que las plegaduras prismáticas y trapezoidales presentan caras con geometría de polígonos cuadrados y de trapecio, cuyas formas son deformables estructuralmente o necesitarían elementos adicionales para garantizar su estabilidad. Las plegaduras piramidales presentan caras trianguladas con pliegues muy extensos que, al momento de alternarse por una barra, esta sería demasiado larga y esbelta.

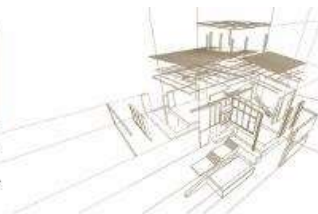
Por lo anterior, gracias a la forma triangular de todas sus caras, la corta longitud de sus pliegues y la estabilidad estructural debido a su disposición, las plegaduras antiprismáticas son la alternativa que cumple con las características de los sistemas estructurales de vector activo.




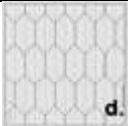
En las plegaduras antiprismáticas, el trazado está compuesto por un grupo de pliegues simétricos inclinados (pliegues diagonales) en las dos direcciones y por un grupo de pliegues verticales que pasan por las intersecciones de los pliegues diagonales.

Las plegaduras antiprismáticas reciben su nombre por el ángulo generado en el trazado y el polígono generado al cierre de la plegadura. De tal manera que, aquellas que tienen un ángulo de 90° , igual que en un cuadrado, recibirán el nombre de plegaduras antiprismáticas cuadradas; aquellas que tienen en su trazado ángulos de 120° , el mismo ángulo interno del hexágono, se llaman plegaduras antiprismáticas hexagonales; y aquellas en cuyo trazado tienen un ángulo de 135° , el mismo ángulo interno del octágono, se nombran plegaduras antiprismáticas octogonales.

Tabla 1: Trazados de plegaduras

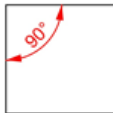




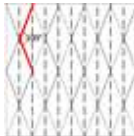

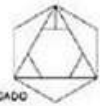

Prismáticas	Antiprismáticas	Piramidales	Trapezoidales
-------------	-----------------	-------------	---------------



			
Pliegues paralelos y perpendiculares.	Pliegues en retículas y ángulos generados entre ellos.	Pliegues concéntricos.	Combinación de pliegues paralelos y retículas de pliegues de ángulos.

Este nombre también tiene relación con el polígono que se forma al plegarse totalmente la plegadura vista frontalmente, correspondiendo dichos polígonos a los anteriormente nombrados. Véase la Tabla 2.

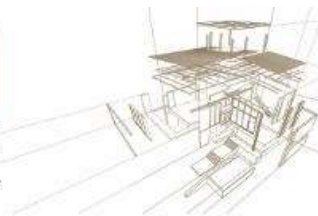
Tabla 2: Geometría de trazados

	Cuadradas	Hexagonales	Octogonales
	Ángulo de 90°	Ángulo de 120°	Ángulo de 135°
Polígono			
Trazado			
Vista Frontal plegadura	 PLEGADO	 PLEGADO	 PLEGADO

1.3.2. Comportamiento de los pliegues

Al plegar la estructura se genera un módulo que, siguiendo el patrón Yoshimura, genera valles y montañas. Específicamente, en el trazado de las plegaduras antiprismáticas visto anteriormente, el grupo de pliegues inclinados se convierte en montañas y el grupo de pliegues verticales y horizontales se convierte en valles. Los pliegues se reemplazarán por barras y las intersecciones por uniones al momento de cambiar el sistema de superficie activa al sistema de vector activo.

El número de elementos que se interceptan en las uniones es primordial al momento del diseño de la unión. Las bóvedas tienen un único tipo de intersección interna con seis elementos que llegan a ellas. Los remates son variaciones de la intersección interna. No varían sus ángulos ni el tipo de barra, lo único que varía es el número de elementos que llegan a ellas, debido a la finalización de la estructura, por lo cual, hay ausencia de algunos elementos. En la cúpula existen tres intersecciones internas diferentes. Una de ellas es crítica por el número de elementos que tiene, 12 en total, mientras las otras dos intersecciones tienen sólo seis elementos; la diferencia entre las dos consiste en el ángulo que se encuentra entre las barras. Al contrario de la bóveda, los remates no sólo varían en el número de elementos, sino también en su configuración. Por lo anterior, la



plegadura antiprismática tipo bóveda es la ideal para realizar la conversión por tener un sólo tipo de intersección.

1.4. Análisis de movilidad

Para los análisis de movilidad se usaron simulaciones tridimensionales por computador en el software Rhinoceros (Figura 2) y solid Edge. Y se realizaron dos tipos de análisis uno en los nudos y otro de la estructura general.

1.4.1. Análisis de movimiento en el módulo

Las plegaduras antiprismáticas están compuestas por varios triángulos exactamente iguales. Se encontró que dentro de las plegaduras se agrupan dos de los triángulos conformando módulos que tienen un comportamiento de movimiento constante, siendo siempre los pliegues que se convierten en valles y los pliegues que se convierten en montañas los mismos. El módulo está compuesto por cuatro aristas cortas (montañas) y una larga (valle).

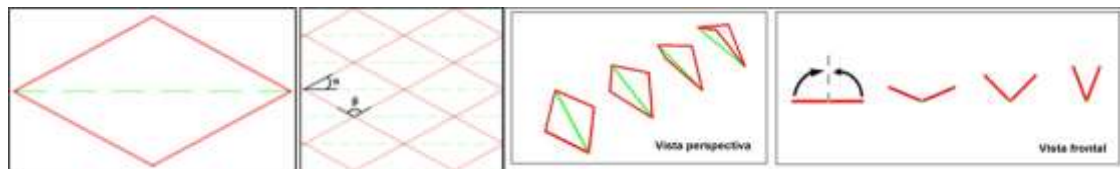


Figura 2: Módulo y Movimiento del módulo. En rojo pliegues de montaña y en verde pliegue de valle.

Se realizó un análisis desde del módulo de la plegadura (Figura 2). El módulo se encuentra compuesto por dos planos que rotan teniendo como eje la arista central (arista larga); los planos siempre conservan un ángulo de 30° entre el cateto representado con verde y los representados con rojo, siendo este el ángulo α ; y un ángulo de 120° entre los catetos representados en rojo, correspondiendo este al ángulo β . Ver Figura 2

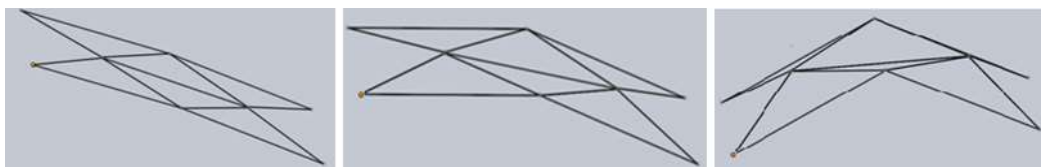
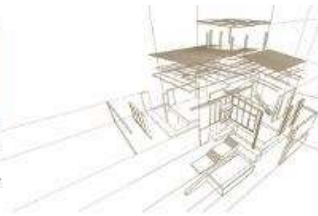


Figura 3: Comportamiento cinemático de varios módulos (en secuencia)

Luego se unieron varios módulos y se identificó que el movimiento se repetía en todos ellos (Figura 3), por lo que se concluyó que estos movimientos eran los que se tendrían en cuenta al momento del diseño.

1.4.2. Cinemática general del sistema

El sistema presenta tres posiciones principales. En la primera, todos los elementos se encuentran sobre un solo plano, asemejándose a una hoja de papel sin pliegues; esta se denominará con ángulo $\theta = 0^\circ$. La segunda presenta la mejor espacialidad y determina la forma de la estructura en bóveda; se denominará con ángulo θ ideal. Finalmente, la tercera es el plegado de la estructura formando un plano vertical cuyo grosor depende del número de elementos y su tamaño; esta se denominará con ángulo $\theta = 90^\circ$ (Figura 4).



Para efectos de la investigación se tuvo en cuenta el movimiento desde la posición con ángulo $\theta = 0^\circ$ hasta la posición con ángulo θ ideal, porque se consideró una buena opción para un acercamiento inicial sobre el tema.

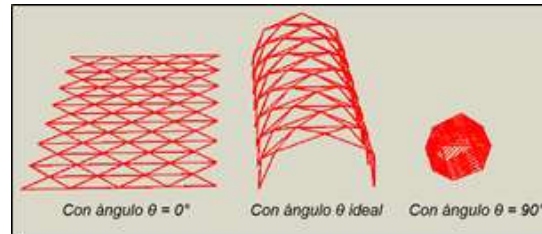


Figura 4: Posiciones principales del sistema

1.5. Diseño y modelado de uniones

Las uniones se diseñaron con el objetivo de ejecutar los movimientos vistos en el análisis del módulo y del sistema en general. Dicho diseño se realizó sin ninguna escala específica, ya que el objetivo del mismo era el de comprobar el funcionamiento cinemático de la unión, del módulo y de la estructura en general. Así mismo, se plantearon uniones metálicas sin especificar el metal a emplear.

A continuación se presentan los requerimientos y diseño de las uniones:

- Se deben mantener el ángulo α en 30° y el ángulo β en 120° . Estos no pueden variar, ya que los planos imaginarios se deben conservar de las mismas dimensiones.
- La rotación de los planos tiene como eje de rotación la barra larga y debe permitir llegar al ángulo de pliegue ideal, el cual, para la bóveda hexagonal de ocho elementos por sección, es de $67,07^\circ$.

Se diseñó una unión que cumplía con los requerimientos anteriores y que inicialmente se usaría en todos los nudos de la estructura. (Figura 5)

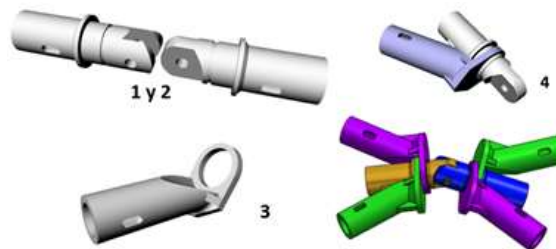


Figura 5: Diseño primera unión basada en el análisis de movimiento del módulo

La unión está compuesta por dos piezas (1 y 2) machihembradas, unidas por un pasador. Estas permiten la rotación entre módulo y módulo, y a ellas van unidas las barras largas.

Luego de esto se necesitó cumplir con la rotación de las barras cortas alrededor de las largas y manteniendo el ángulo de 30° . Por eso se diseñó una pieza (3) que, por medio de un agujero, se introduce en las primeras piezas y permite el giro manteniendo el ángulo α en 30° (4). Todas las piezas son tubulares y tienen agujeros para permitir el anclaje de las barras.

Ya resuelto el movimiento con la primera unión, se simuló la totalidad de la estructura, encontrando que este tipo de unión no era suficiente para todas las intersecciones, pues en el momento de hacer el movimiento total de la estructura, dichas uniones no se movían adecuadamente, ya que, aunque en planta se vieran exactamente iguales, al verlas tridimensionalmente se diferenciaban por su ubicación espacial dentro de la morfología de la



estructura, es decir, unas se encuentran más arriba (en verde) que las otras. Funcionando las primeras uniones muy bien para los nodos que se encuentran en la parte más baja (en amarillo). (Figura 6) Por lo cual se procedió a diseñar las uniones de elevación.

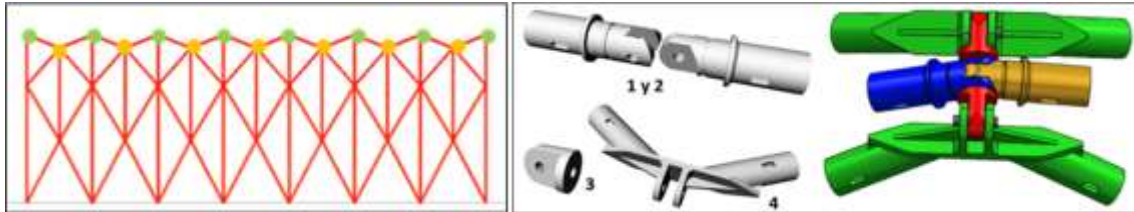


Figura 6: Vista lateral de ubicación de uniones en estructura (Izq.) Uniones de elevación (Der.)

En el diseño de la unión de elevación se utilizaron las mismas piezas macho y hembra de la primera unión, pero en lugar de estar unidas por un pasador, se unieron por medio de un espárrago, en el que se enrosca posteriormente la pieza 3.

Posteriormente se une la pieza número 4 que garantiza el ángulo β de 120° , permitiendo la rotación de elevación al unirse al resto de la unión. (Figura 6)

Las uniones se diseñaron utilizando la menor cantidad de piezas posibles y se usaron piezas conjuntas en ambas uniones. Además de las piezas, las uniones están compuestas por accesorios como: pasadores, segger, espárragos y, adicionalmente, tornillos para unir las barras a ellas.

1.6. Modelos de comprobación

Para la comprobación del diseño se decidió hacer un prototipo escala 1:3, fabricando las piezas de las uniones con impresora 3D en plástico PLA. Las uniones fueron fabricadas como piezas individuales, provistas de los agujeros necesarios para su posterior ensamble. Luego de fabricadas, las piezas individuales se ensamblaron con las barras de madera siguiendo los planos obtenidos en el diseño y utilizando pasadores de cobre, seeger de acero y tornillos. Luego se realizó el montaje del módulo con una unión de elevación y cuatro remates de la unión inicial, comprobando la movilidad adecuada del módulo y el buen comportamiento cinemático de las uniones. Figura 7 (Izq.)



Figura 7: Prototipo de módulo ensamblado (izq.) y Montaje 1 prototipo escala 1:3. (Der.)

Se realizó un primer montaje de dos tramos de la estructura, realizando el movimiento de las uniones hasta plegarla estructura adecuadamente. Se encontró una deficiencia estructural en las uniones del prototipo debido al proceso de fabricación de las piezas, haciendo que se rompieran fácilmente, perdiendo así la estabilidad de la estructura. En la Figura 7 (Der.) se presentan las imágenes del primer montaje.

Se necesitó hacer un tratamiento de endurecimiento a las piezas y, luego de este, se procedió a realizar un nuevo montaje, en cual se usó una base metálica para anclar la estructura. La Figura 9 muestra el último montaje del prototipo escala 1:3.

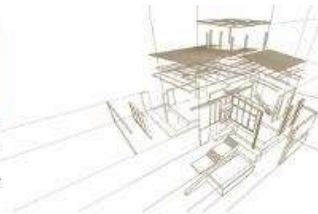


Figura 9: Montaje prototipo escala 1:3. Montaje 2.

1.7. Ajustes a escala 1:1

Con lo encontrado en el prototipo escala 1:3, se realizaron ajustes en cuanto a la movilidad del sistema, directamente en las uniones, creando algunos topes que evitaran movimientos innecesarios y permitieran únicamente los movimientos necesarios para el pliegue de la estructura hasta el ángulo θ ideal.

Debido a la diferencia de material y proceso de fabricación, entre el prototipo y la estructura final se hicieron ajustes de medidas y componentes de las uniones. El material propuesto para las uniones finales fue acero al carbón. La Figura 30 presenta los modelos de las uniones con las modificaciones. Además de los topes que restringen algunos movimientos, se cambiaron los segger por tuercas que impide que las piezas hembras se salgan.

1.8. Conclusiones

- Después del análisis de movilidad en nudo y módulo, se concluyó que el diseño de las uniones se debería realizar con base al movimiento de los módulos, ya que es consecuente con la cinemática general del sistema. Y las uniones cumplieron con los siguientes requisitos:

- Se deben mantener el ángulo α en 30° y el ángulo β en 120° . Estos no pueden variar, ya que los planos imaginarios se deben conservar de las mismas dimensiones.
- La rotación de los planos tiene como eje de rotación la barra larga y debe permitir llegar al ángulo de pliegue ideal, que, para este caso de la bóveda hexagonal de ocho elementos por sección, es de: $67,07^\circ$.

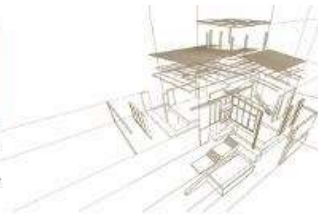
- Al diseñar las uniones se utilizó la mínima cantidad de piezas diferentes. Aunque entre la unión normal y la unión de elevación se realizaron diferentes configuraciones y se necesitó usar algunas piezas diferentes.

- En el análisis cinemático de la estructura se concluyó que el sistema presenta tres posiciones principales: plan o con ángulo $\theta=0^\circ$, plegada con ángulo θ ideal y plegada totalmente o ángulo $\theta=90^\circ$.

- Al realizar la conversión de una plegadura a un sistema de vector activo se cumplieron las principales características de este: elementos cortos, triangulación, nudos articulados, carga aplicada en los nudos y barras a compresión o tracción.

- Los prototipos a escala, la simulación y modelos por computador permitieron comprobar la movilidad de las uniones y de la estructura en general. Al realizar el montaje del prototipo escala 1:3, se comprobó la simplificación del proceso constructivo, contrastado con la complejidad del sistema constructivo de los sistemas de superficie activa.

- La estructura a futuro podría realizar un gran impacto social, por su facilidad de construcción. Además los costos y tiempos de ejecución son más bajos la prefabricación de la mayoría de los elementos de la estructura.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros:

Engel, H. (2001) Sistemas de estructuras, primera edición. Gustavo Gili, Barcelona, España.

Jackson, P. (2011) Técnicas de plegado para diseñadores y arquitecto, Promopress. Barcelona, España.

Saldadori, M.G. and Baron, M.L. (1961). Numerical Methods in Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

Mariño, R. (2004). La geometría en el arte y el diseño. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Schumacher, M., Schaeffer, O., & Vogt, M. (2010). Move. Hannover, Alemania

Villate, M. C. (2008). Estructuras no convencionales en arquitectura. Editorial Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

Revistas:

De Temmerman, N., Mollaert, M., and Van Mele (2006) Development of a foldable mobile shelter system, in International conference on adaptable building structures eindhoven the Netherlands, Netherlands, p.5