

**SER ERÉCTIL: ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DEL PARAGUAS  
RETICULAR DE BARRAS PREFLEXTADAS**

Rodríguez, Nelson

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Universidad Central de Venezuela, Caracas.  
nelsonalexander2@gmail.com

**Prefacio:**

En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en la tesis doctoral realizada por el autor, en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela de Arquitectura de Barcelona (UPC), bajo la tutoría del Dr. José Llorens y del Dr. Ramón Sastre como co-tutor, con la asesoría del Dr. Jürgen Henniecke del Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart y el Dr. Dieter Strobel de la empresa Technet (Stuttgart).

**Introducción:**

Se presenta una sucinta descripción de las potencialidades de las estructuras ligeras de rápido montaje (estructura transformable), utilizando como método constructivo la preflexión de una malla plana para obtener una forma geométrica en equilibrio y rigidizada con una membrana textil pretensada colgada.

Se hará énfasis los aspectos constructivos, detalles y componentes. Así como también en el proceso de búsqueda de la forma, proceso de montaje y el comportamiento estructural ante cargas externas que permiten definirla como una estructura pre-flextada, así como también

## Método de búsqueda de la forma por curvas de flexión

Deberá tomar en cuenta:

### 1.- Propiedades mecánicas de la barra

- modulo de elasticidad, modulo de rotura, Resistencia a la flexión, Resistencia a la tracción, Resistencia a la compresión

### 2.- Propiedades de la geometría del perfil de la barra

- Área de la sección de la barra, Momento de inercia, Momento resistente a la flexión y a la torsión

En términos globales la estructura debe cumplir los siguientes aspectos:

### 1.- La condición de equilibrio donde las fuerzas en cada nudo libre es cero

### 2.- El material se comporta de acuerdo a la ley de Hook

### 3.- La geometría esta en estado de deformación

### 4.- Para cada estado de tensión hay una deformación

## Fundamento geométrico del método por flexión como estructuras transformables

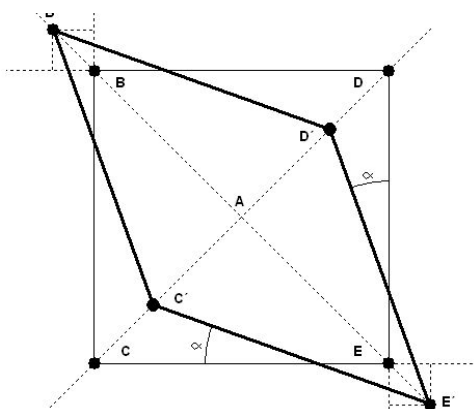


Figure 6 Esquema geométrico  
Fuente: Elaboración propia

Cuando la malla es plana la celosía es un mecanismo con grados de libertad.. El nudo articulado causa fricción entre sus componentes, la barra se mueve paralela a la otra causando en todo el cuadrado un rombo y que la malla tenga un comportamiento como un paralelogramo. Este movimiento causa cambios en la longitud de la diagonal entre los nudos, donde dos de ellos se alejan (B y E) del centro (A) y dos de ellos se acercan (C y D) al centro (A): Los grandes movimientos de la malla y los cambios en los ángulos entre las barras, indican que la forma inicial global fue alterada conformando la doble curvatura

## Búsqueda de la forma por el método de curvas de flexión (modelos físicos)

Para la comprobación del método elaboramos modelos físicos experimentales a escala (1:10) en diferentes materiales que nos permitieran encontrar las coordenadas de la cubierta, estudiar el método de erección y sus implicaciones constructivas, la estabilidad estructural y la capacidad transformable de la malla

### Proceso de erección Modelo en barras rígidas en perfiles huecos de poliéster



Fig. N° 7 Modelos físicos experimentales  
Fuente: Elaboración propia

### Resultados:

#### Comportamiento de la malla

- En el centro de la malla se mantiene ortogonal y comienza a variar el ángulo hacia el perímetro tomando forma de rombo hacia las esquinas.

#### Comportamiento de los arcos

- Los arcos están definidos por 4 barras.
- El empuje lateral causado por los componentes de la malla hace que los arcos tomen una curva de flexión hacia afuera.
- Como son 4 barras formando los arcos perimetrales estos tienden a unirse entre los nudos si no hay separadores.
- Arriostre con tensor al nivel de la clave de los arcos perimetrales.
- Los perfiles huecos tienen mayor inercia y presentan mayor resistencia a la deformación, pero se gana en rigidez global de la malla

Las barras plásticas ofrecen prestaciones a la estructura por ser un material muy flexible, con altas resistencias y con una relación peso/área cubierta muy favorable a la hora de pensar en una estructura transformable. A este modelo físico se le colocó la membrana para comprobar que la pretensión podía rigidizar toda la estructura

Hasta este momento desconocíamos la carga exacta que hay que aplicar para deformar la carga y la flexión inicial que produce esta carga. Para despejar estas incógnitas realizamos el mismo modelo simulado por computadora.

### Búsqueda de la forma por el método curvas de flexión (modelo por computadora)

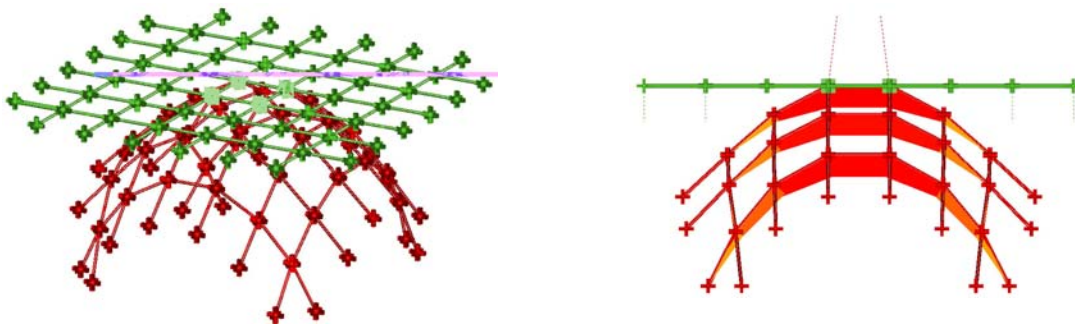
Para realizar este estudio se utilizó el programa EASY® de la empresa Technet, el cual es un programa de elementos finitos interactivo que calcula la forma a través del método de la densidad de fuerza.

Carga final aplicada a los nudos (KN): **0.30**

Cantidad de Nudos (Unidad): **8**

Total de carga aplicada (KN): **2.40**

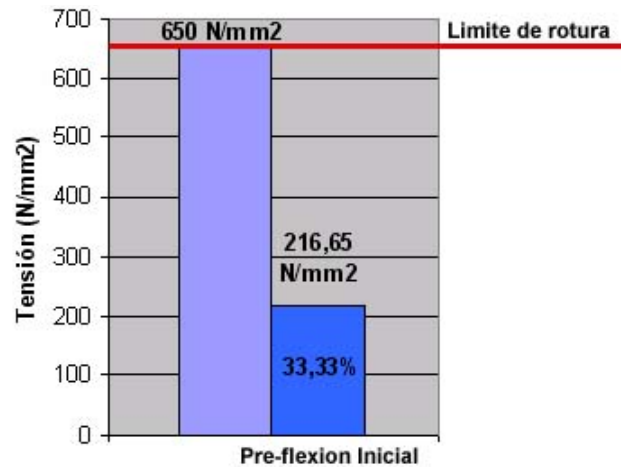
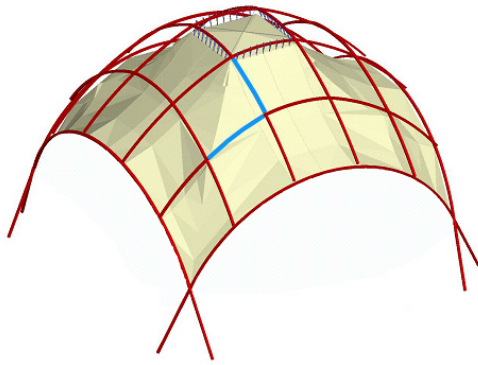
### Carga para la deformación inicial



Momento de Flexión Máximo: =0.359 KN

Fig. N° 8 Modelo por computadora  
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la fig. N° 9 la preelección inicial (0.359 KN) no compromete el límite de rotura del material en virtud que consume un 33,33% ( $216,65 \text{ N/mm}^2$ ) de su capacidad. Estando las barras críticas en las señaladas con la línea azul.



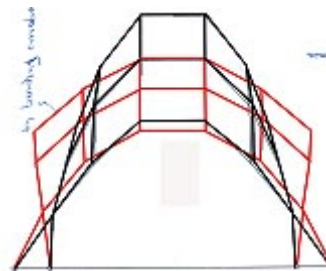
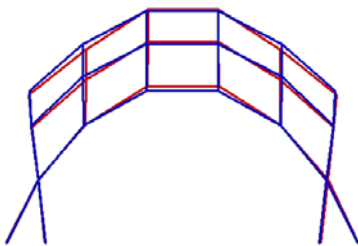
Ubicación Barra crítica en la malla

Fig. N° 9. Tensión crítica de la malla pre-flexada  
Fuente: Elaboración propia

En estas imágenes se muestra la forma obtenida por computadora al aplicarle a la malla una carga de 30Kg en los terminales de cada las barras de las esquinas introduciendo la pre-flexión a las barras

**Comparación gráfica entre la geometría obtenida en el modelo físico y por computadora**

**Deformación de una malla con diferentes propiedades bajo igual carga inicial**



Línea Roja: Modelo físico

Línea Roja: Modelo por curvas de flexión

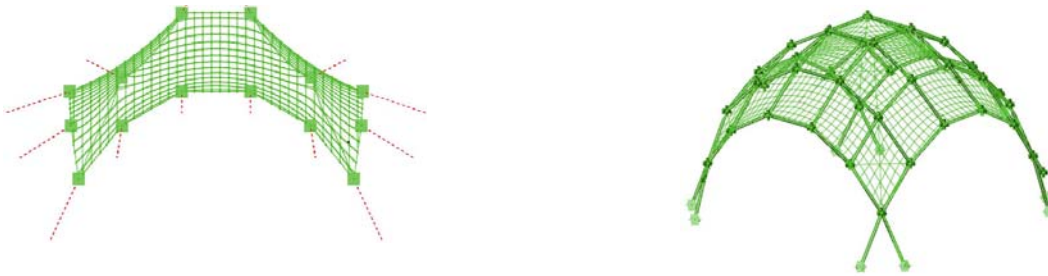
Línea Azul: Modelo computarizado

Línea Azul: Modelo suspendido

Fig. N° 10 Comparación entre modelo computarizado y modelo físico  
Fuente: Elaboración propia

De la primera comparación se puede comentar que la geometría global coincide tanto la encontrada en el modelo físico como en el modelo por computadora y las diferencias se presentan en el interior de la malla, el cual a efectos de proceso son despreciables. En la segunda comparación se demuestra como bajo una misma carga con una malla de igual configuración geométrica inicial pero con diferentes propiedades asignadas los resultados geométricos son distintos donde las diferencias entre las coordenadas, geometría y forma son significativas.

### Colocación de la membrana pretensada



Membrana con pretensión

Fig. N° 11 Modelo por computadora barras y membrana  
Fuente: Elaboración propia

Para la introducción de la membrana pretensada se realizó la búsqueda de la forma partiendo de los puntos generados por las barras para que esta pudiera amarrarse en los arcos del borde y en la cresta de la cúpula.

### Esfuerzo de flexión inicial

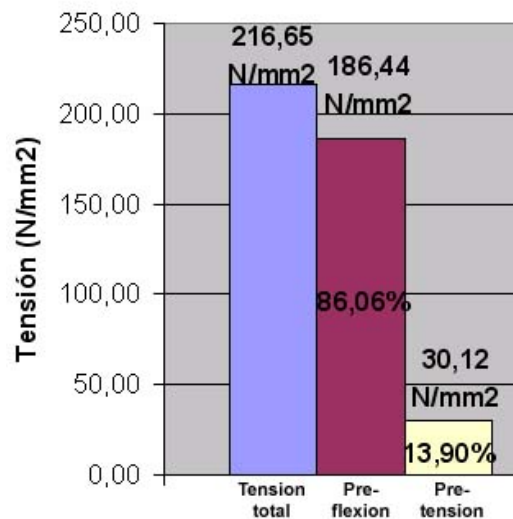
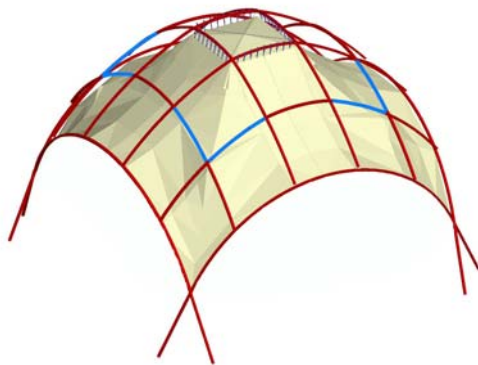


Pre-flexión máxima inicial: 0.31 KN

Pre-flexión máxima+pretensión: 0.329 KN

Fig. N° 12 Modelo por computadora barras y membrana y la pre-flexión  
Fuente: Elaboración propia

Una vez introducida la pre-tensión de la membrana se observo que el incremento en la preflexión inicial no fue significativo y de la tensión total de la malla preflexada y la membrana pre-tensada observamos que la pretensión aporta un 13,80% y la preflexión es el 86,06%, tal y como lo muestra la fig. N° 13.



Ubicación Barra crítica en la malla

Fig. N° 13 Tensión crítica de la malla pre-flexada + membrana pre-tensada  
Fuente: Elaboración propia

El valor de la flexión (bending) inicial, representada en la zona roja su distribución sobre el arco, depende del módulo de elasticidad del material, de las propiedades geométricas de la sección transversal de las barras y de la rigidez de las uniones en sujetar las barras para que no se produzcan desplazamientos. De esta comparación entre la pre-flexión inicial y la preflexión más la pretensión de la membrana nos indica que la membrana no introduce un aumento considerable de la preflexión en las barras, pero sí contribuye a su rigidización evitando que entre las barras aparezcan diagonales distribuidas en toda la superficie.

El peso propio del módulo es el especificado en la siguiente tabla

Peso Propio Total Cubierta	67,334 Kg	6,733 KN
Peso Propio por cada nudo	1,870 Kg/nudo	0.187 KN/nudo
Peso Propio por m <sup>2</sup>	2,804 kg/m <sup>2</sup>	0.280 kN/m <sup>2</sup>

Tabla 1. Peso propio del modulo

Para comprobar estos cálculos se construyó un prototipo con las mismas características de la malla deformada por computadora y los resultados fueron altamente satisfactorios, a demás permitió resolver los detalles constructivos de los nodos, anclajes y unión de la membrana con la estructura.

### **Descripción de los componentes constructivos:**

Los nudos fueron diseñados por presión en virtud que el material de la barra no era posible perforarlo debido a sus características de plástico frágil, por lo que utilizó abrazaderas con sistema tipo clip´s unidas a unos platos metálicos que giraban y permitían la transformación del cuadrado en rombo, así como, trancar el movimiento cuando el proceso de erección llegaba a su final. (fig. N°14)



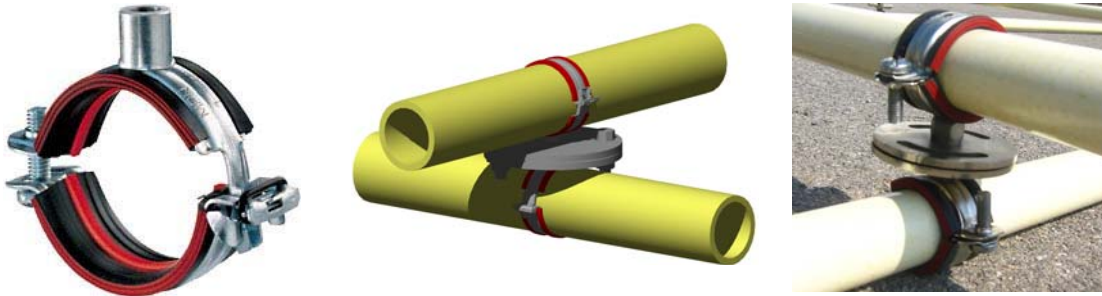


Fig. N° 14 Nodo  
Fuente: Elaboración propia

Las barras son de material Fibra de Vidrio reforzado con PVC, lo cual es óptimo para un uso en una estructura transformable que debe ser ligera. También se puede señalar el excelente comportamiento estructural de los perfiles PRFV, del cual se deduce que, aunque es frágil, es un material adecuado para colocarlo a trabajar a la flexión dada su alta resistencia a estos esfuerzos, siempre y cuando las fuerzas que actúan sobre él sean repartidas equitativamente a lo largo de la barra y no haya concentraciones de esfuerzos en puntos específicos.



Fig. N° 15: Barras  
Fuente: Elaboración propia

Tipo de material: Fibra de Vidrio reforzado con PVC

Peso global: **29.16 Kg**

Longitud max. **6mts**

	PRFV
Modulo de elasticidad (KN/m <sup>2</sup> )	2,3x10 <sup>7</sup>
Resistencia a la rotura (KN/m <sup>2</sup> )	6,5 x10 <sup>5</sup>
Resistencia a tracción (KN/m <sup>2</sup> )	4x10 <sup>5</sup>

Por otra parte, la longitud de la barra de 6 m, además de ser liviana y fácil de transportar, produce una geometría proporcionada entre las alturas y las luces dado que por una parte permite el acceso al interior de la cúpula y por la otra una vez dentro se pueden realizar actividades.

### Terminales de barras del Borde



Fig. N° 16. Terminal de las barras  
Fuente: Elaboración propia

Los terminales de barras de los bordes están conformadas por una barra de plástico de transición, el sistema telescópico de nivelación en tubos de acero. Este terminal de barra de los arcos contribuye con un peso inicial al proceso de deformación. ( fig. 16):

### Bases



Figura N° 17 Bases  
Fuente: Elaboración propia

La bases, ubicadas luego del Terminal de las barras de l borde son articuladas con giro en un sentido (asegurado por el pasador y el otro sentido el tubo roscado permite corregir pequeños ángulos de dirección), esto con la finalidad de adaptarse a los ángulos finales de la malla, Esta pieza está conformado por la base giratoria, separadores y pernos de unión. (fig. 17)

## Plancha de anclaje superficial



Figura N° 18 Bases

Fuente: Elaboración propia

Los anclajes son de planchas de aluminio estrellado perforado para recibir las bases de la malla, estas planchas, están reforzadas con unos perfiles "U" y unos perfiles "L" remachados, donde serán colocados los pesos al preflexar la estructura. La plancha cuenta con unas aberturas con separaciones de 80 y 70 centímetros para recibir las bases de la malla (.fig. 18)

## Armado de la malla:



Figura N° 19 Armado de la malla

Fuente: Elaboración propia

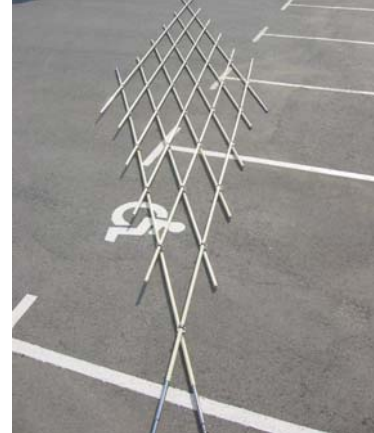
Para armar la malla se procede primero a colocar as barras y nudos centrales en ambos sentidos, seguido por la Colocación de las barras inferiores en un sentido y colocación de todos los nudos, seguidamente se colocan las barras superiores y se concluye el armado apretando los nodos con el sistema clip

## Comprobación del primer nivel de transformabilidad de la malla

### Estructura desplegada



### En posición intermedia



### Posición plegada



Fig. N° 20: Primera transformabilidad de la malla  
Fuente: Elaboración propia

En este primer nivel de comprobación los nudos funcionaron perfectamente haciendo plegar la malla hasta su posición totalmente cerrada para ser transportada y abierta para ser montada en el sitio. La longitud total de la malla plegada es de 12m. El transporte de la malla se puede abordar desde varios puntos de vista, uno es el prever transporte especial para transportar la malla totalmente armada y plegada, con lo cual la tolva tendrá como mínimo la longitud de la malla cerrada.

## Proceso de erección

### Planteamiento original

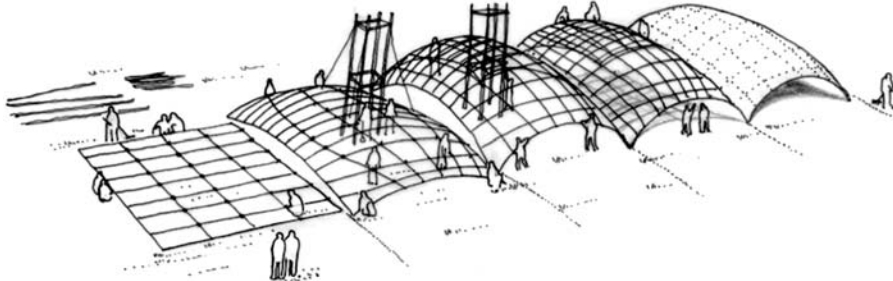


Fig. N° 21: Boceto inicial  
Fuente: Elaboración propia

El proceso de erección se realizó con grúa y dentro de sus ventajas están (fig. 22):

- El proceso de deformación es homogéneo gracias a la fuerza mecánica que se le aplica desde la grúa.
- Es más fácil para controlar todo el proceso de preflexión.
- Es más rápido (tiempo: 5 min)
- Requiere máximo de cuatro operarios o menos.

### Prototipo



Fig. N° 22 Proceso de erección del prototipo  
Fuente: Elaboración propia

Entre los principales problemas que se tuvieron que solucionar en el proceso de montaje estuvo que la cúpula perdió la flexión de las barras internas en la malla al descolgarla de la grúa-pluma. Esto se debió a que en las abrazaderas con el sistema clip´s, no aplicaron la suficiente presión sobre las barras permitiendo que éstas deslizaran a nivel de los arcos de borde llegando a desplazamientos entre los 20 a 30 centímetros, lo que obligo a disminuir el roce entre los nudos y las barras (fig. 19)

### **Pérdida de la geometría y la pre-flexión**



Fig. N° 23: Pérdida de la geometría  
Fuente: Elaboración propia

El rediseño consistió en asegurar que el nudo no permitiera que la barra se desplazara y éste perdiera su eje, esto se materializó colocando a ambos lados de la abrazadera unos topes de plásticos, encolados con resina, estos topes son de una sección más pequeña que la barra para que le aplicara presión, por otra parte se encoló con el mismo pegamento de resina un forro de goma a la abrazadera para que esta no se desprendiera del aro metálico de la abrazadera. Todo estos cambios se realizaron con el objetivo de aumentar el roce entre la barra y el nudo sin que el aspecto visual del nudo se modificara considerablemente.

## Rediseño del nudo

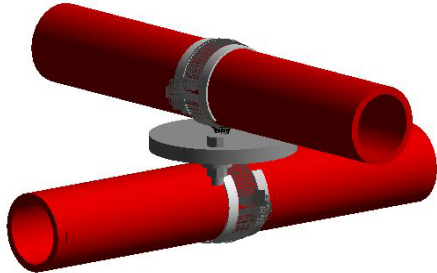


Fig. N° 24: Nueva propuesta de nudo con topes  
Fuente: Elaboración propia

En esta segunda oportunidad, una vez retirada la grúa, los nudos funcionaron muy bien al no permitir el desplazamiento de la barra, como se dijo antes, con lo que éstas mantienen su pre-flexión. Nudo bloqueado con tornillos y tuerca que impiden el movimiento de rotación o giro del nudo encentrándose en la posición correcta y sin presentar deformaciones no deseadas ni excentricidades entre las barras

Los elementos de tope y de aumento de roce funcionaron y no permitieron que la barra se deslizará a través de la abrazadera

## Prototipo



Fig. 25 Prototipo final construido  
Fuente: Elaboración propia

El peso global/área cubierta es de  $3.57 \text{ Kg/m}^2$ , lo que significa que se obtuvo una estructura bastante ligera. De las limitaciones se puede comentar que las luces tanto teóricas como las obtenidas en el prototipo son iguales, mientras que en las alturas existe una diferencia de 9,3% entre los modelos

## Conclusiones

El método de obtención de la forma por curvas de flexión, parte del supuesto que cuando la malla es curvada, actúen sobre ella cargas de igual magnitud y de igual sentido; para que la malla pueda repartirla uniformemente en todas las barras que la forman, deformando así toda la malla homogéneamente generando la cúpula apoyada en cuatro puntos con arcos perimetrales de borde. En este sentido, se comprobó la relación forma=estructura

Este método basado en las curvas de flexión explica con mayor exactitud la mecánica de las estructuras por deformación donde la estructura siempre necesita de estar pre-cargada por lo que requieren de un sistema para aplicarles la pre-flexión



La longitud de la barra, el diámetro y su peso son los factores determinantes para la obtención de la forma y estas propiedades definen la fuerza inicial que hay que aplicar para deformar la malla, la luz a cubrir, la relación flecha/peso y área cubierta/peso

Desde el punto de vista geométrico, para que la malla sea una estructura transformable requiere de deformar el damero original de la malla plana en rombos en la malla deformada. Las barras pueden volver a su estado original plano, pudiendo ser reutilizadas sin perder sus propiedades estructurales, lo cual hace que el ciclo de vida del material se alargue y se pueda definir el sistema con una estructura transformable.

El comportamiento estructural global de la malla a flexión depende de la sección de la barra, el valor del modulo de elasticidad y de la rigidez de las uniones. Donde las barras transmiten fuerzas de compresión y la membrana de tracción.

*El nodo funciona bien en el proceso de abertura y cierre de la malla, permitiendo que la malla pase de la conformación geométrica de cuadrado o damero a rombos, exigencia indispensable que debía cumplir para que sea una estructura transformable, pero no logra, por si sólo, mantener la pre-flexión de la malla debido a que el acabado de la barra es bastante liso y el nudo resbala sobre la barra, por lo que se hace necesario introducir elementos adicionales para aumentar el roce entre los dos componentes. En términos globales el proceso de montaje se llevó a cabo sin que se presentaran roturas en las barras*

Con esta investigación experimental se comprobó esta nueva tipología estructural, que sustituye peso por fuerza, pudiéndose llamar “ **ESTRUCTURAS PRE-FLECTADAS**”. Queda demostrado como se puede, igual que la hormiga, cargar con más peso que el peso propio del esqueleto sustentante, lo que genera una eficiencia estructural.

**Índice de citas:**

- [1] Otto, Frei, Kenso Tange (1974) Grid Shells. Institute for Lightweight Structure (IL). University Stuttgart.

**Referencias de bibliograficas**

- [1] Escrig, Felix. (1995 ) Mobile and Rapidly assembled structure vol. I and vol.II. Mechanis Publications. Sevilla.
- [2] Gantes, Charis. (1996) Deployable Structure: Analysis and Design. Wit press.Boston.2001
- [3] Hernández, Carlos (1998) Experiencias en el Desarrollo de las Estructuras Transformables. Mimeo. IDEC-FAU-UCV. Caracas.
- [4] John F. Abel, John W. Leonard . INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES INTERNATIONAL SYMPOSIUM (1994 : Atlanta) Spatial, lattice and tension structures : proceedings of the IASS-ASCE International Symposium 1994. International Association for Shell and Spatial Structures and Committee on Special Structures, Structural Division, American Society of Civil Engineers;. New York
- [5] Llorens i Duran, Josep ignaci.( 1986) Ancoratges Passius d'estructures traccionades. tesi Presentada a l'Escola Técnica Superior d'Arquitectura de Barcelona. Universitat Politècnica de Barcelona.
- [6] Otto, Frei, (1995) Bodo Rasch: finding form : towards an architecture of the minimal. Stuttgart.
- [7] Otto, Frei (1973)Estructuras: Estudios y trabajos sobre la construcción ligera, editado por Conrad Roland, G. GiliDL
- [8] Otto, Frei y Tange Kenso (1974) Grid Shells. Institute for Lightweight Structure (IL). University Stuttgart.
- [9] Zalewski, Waclaw.( 1998) Shaping structures statics, New York.