

## Estructura transformable de malla de barras plectadas

Nelson Rodríguez

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción  
Universidad Central de Venezuela

### Resumen

Se presenta una sucinta descripción de las potencialidades de las estructuras ligeras de rápido montaje, utilizando como método constructivo la preflexión de una malla plana para obtener una forma geométrica en equilibrio y rigidizada con una membrana textil pretensada. Se pone el énfasis en el proceso de búsqueda de la forma, proceso de montaje y el comportamiento estructural ante cargas externas que permiten definirla como una estructura transformable y plectada.

### Abstract

*Abstract A concise description of the potentialities of the light structures of rapid assembly utilised as a constructive method in the bending of a flat wire-netting to obtain a geometric balanced form with a prestressed textile membrane. The emphasis will be made in search of a process of form, assembly and the structural behaviour in the presence of faced-external weights which permits defining it as a deployable and prebending structure.*

En este trabajo se presentan 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 Henniscke del Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart y el Dr. Dieter Strobel de la empresa Technet (Stuttgart).

Es parte del problema de este trabajo la viabilidad técnica de obtener cubiertas en forma de cúpulas con elementos estructurales curvados por flexión, la búsqueda de la forma y el cerramiento de la cubierta con membrana textil colaborante para la estabilidad y rigidización estructural del módulo, así como también las formas de apoyo, sus detalles, uniones, componentes y su combinación con otros módulos, entendida ésta como una estructura transformable. En este sentido se asume como estructuras transformables toda estructura que tenga capacidad de moverse, plegarse, deformarse, cerrarse y abrirse por la acción de una fuerza externa, por lo cual precisa de mecanismos en los nodos que hagan posible la transformabilidad. Y por otra parte, se entiende como estructuras plectadas, un tipo de estructuras transformables compuestas por barras en forma ortogonal tipo malla que por efecto de una fuerza externa (en este caso de preflexión) es capaz de deformar la malla originalmente cuadrada a rombos.

Desde el punto de vista metodológico esta investigación tuvo dos fases fundamentales, la fase conceptual

### Descriptores:

Estructuras transformables; construcción ligera; malla pre-flectada; método constructivo.

### Descriptors:

*Transformable structures; lightweight construction; pre-flexed mesh; construction method.*

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN | Vol. 27-1 | 2011 | pp. 09-30 | Recibido el 19/03/10 | Aceptado el 18/06/10

inicial que abarcó un estudio bibliográfico y de estudio de caso sobre estructuras de rápido montaje y los sistemas de tensión orientados al estudio de la taxonomía y clasificación de la tipología, geometría, generación de la forma, y los fundamentos técnicos y constructivos. La fase de desarrollo experimental que se presenta en este trabajo se realizó siguiendo la metodología definida por H. Berger (1996) para abordar un proyecto de diseño estructural. Abarcó tres etapas: el diseño conceptual, donde se contemplan las variables del contexto temático y la generación de alternativas de carácter exploratorio para su evaluación y selección. En esta etapa se construyeron modelos físicos cuyo objetivo fue estudiar las coordenadas, geometría y comportamiento global de la estructura durante el proceso de erección.

La segunda etapa está referida a la elaboración de modelos de simulación computarizada para determinar el comportamiento y prevenir aspectos colaterales no deseados como deformaciones y colapsos. Con estos modelos computarizados se estudiaron las coordenadas, geometría, forma de la membrana y el análisis de los esfuerzos iniciales necesarios para introducir la plectación en las barras, así como las tensiones para determinar los puntos críticos de la estructura. La tercera etapa está definida por la realización del diseño de componentes y detalles constructivos, haciendo especial énfasis en los nodos. Es en esta etapa donde se determinó la forma estructural definitiva y su dimensionamiento. Finalmente la comprobación se llevó a cabo a través de la construcción de un prototipo a escala real para estudiar los aspectos constructivos y de producción que inciden en el diseño. De acuerdo al esquema de Berger habría que comentar que las tres etapas fueron interdependientes por lo que los resultados, al afectarse entre sí unos a otros, establecen un camino interactivo de ida y vuelta entre las etapas, teniendo en muchos casos que revisar resultados de etapas anteriores para avanzar. En este artículo se presenta un resumen de este proceso.

Hay que aclarar que el cálculo matemático de las estructuras plectadas ha sido posible únicamente por métodos aproximados, aunque el estudio del comportamiento estático de las mallas y la influencia de las tensiones que actúan sobre los componentes estructurales es decisivo tanto para encontrar la forma como para su comportamiento como estructura, ya que en este tipo

de estructuras para cada estado de tensión corresponde una deformación.

## Antecedentes

Como antecedente importante se puede mencionar que los trabajos directamente vinculados al sistema estructural referido en esta investigación de mallas deformables corresponden a los prototipos y estudios desarrollados por el Instituto de Estructuras Ligeras IL de la Universidad de Stuttgart aunque cabe destacar que las investigaciones realizadas por los profesores Frei Otto, Jürgen Henricke y demás miembros del equipo del IL no contemplaban la posibilidad de reutilización de la malla, ni su capacidad portátil. Estas estructuras pueden ser redefinidas como estructuras transformables si son vistas como método constructivo. La principal innovación de estos estudios y prototipos consistió en desarrollar un método de búsqueda de la forma, a través de los modelos de estructuras colgantes y basadas en el cálculo de la catenaria.

## Malla espacial deformada

Frei Otto (1974) en el libro IL-10 define las estructuras de mallas por deformación como: "... una red formada por barras y nodos curvados en el espacio. Las barras originalmente forman una rejilla plana con distancia constante entre los nodos...".

Esta definición sólo abarca la configuración geométrica y es el ingeniero Edmund Happold (1976) en el artículo "Calculation of the Shell" publicado en el IL-13 Multihalle Mannheim, quien amplía la definición aportada por Otto e introduce las características del comportamiento de la malla cuando es mecanismo. En este sentido, afirma: "...Una malla de celosía es una superficie de doble curvatura formada por una red de barras de madera unidas por tornillos, espaciadas uniformemente en las dos direcciones. Cuando la malla es plana la celosía es un mecanismo (...) La malla está formada por elementos rígidos con fricción entre las uniones. Cuando una barra se mueve paralela a la otra causa en el cuadrado de la malla un comportamiento como un paralelogramo. Este movimiento causa cambios en la longitud de la diagonal entre los nodos del cuadrado original deformando la malla y conformando la doble curvatura (...) los gran-

des movimientos de la malla y los cambios en los ángulos entre las barras, indican que la forma global que se ha obtenido puede ser fácilmente alterada por cualquier fuerza que actúe sobre ella”.

A partir de las anteriores citas se puede elaborar una definición propia de las ‘mallas por deformación’. Para efecto de este trabajo, son todas aquellas formas constituidas por mallas originalmente planas de barras continuas preflexadas dispuestas en damero y unidas por nodos articulados. La superficie resultante, después de un proceso de transformación, permite soportar cargas mayores a su peso propio. Para diseñarlas precisan de un proceso de búsqueda de la forma y, para montarlas, necesitan de mecanismos en las uniones que permitan el cambio de forma, accionado, todo el sistema, por una fuerza externa que introduce una tensión de flexión a los componentes.

### Métodos de diseño y obtención de la forma

Según Chris Williams (2000), profesor del Departamento de Arquitectura e Ingeniería Civil de la Universidad de Bath, obtención de la forma (*form finding*) para mallas deformadas, es el proceso mediante el cual se configura una geometría estructural capaz de soportar una carga. En este sentido, otro de los aportes de Otto fue desarrollar un método para obtener *form finding* a través del método de la forma suspendida deduciendo así los empujes de las mallas. El profesor Otto define el proceso de obtención de la forma como: “... un proceso donde la estructura es planificada y desarrollada. En cada fase, la forma de la estruc-

tura es tangible y visible. Un proceso de obtención de la forma (*form finding*) es un proceso interactivo optimizado. Cada fase provee una forma inicial que se convierte en la base para la siguiente fase. El criterio para este proceso de optimización es determinado por la relación entre la forma, la construcción y la función de la estructura. (..) La forma de la red cuando está extendida sobre un plano es cuadrada. Las líneas de la red son inicialmente rectas formando una rejilla ortogonal. El patronaje de la red colgante es el desarrollo plano y ortogonal de la forma curva. Éste contiene la longitud de todas las líneas de la red. (..) la forma suspendida es la forma de la curvatura de la red. Para la construcción de cáscaras, se voltea y complementa la forma de la red suspendida. Estas formas antes suspendidas como redes y luego invertidas configurando cáscaras, son predominantemente sinclásticas ...”

Lo que el profesor Otto refiere en esta definición es, en resumen, que en una malla todo lo que trabaja en una primera etapa a tracción, invirtiéndola en una segunda etapa, es solicitada a compresión por lo que el método desarrollado por el equipo del “IL” para diseñar formas fue una versión del método ideado por Gaudí a partir de los modelos colgantes. Este método genera bóvedas sinclásticas, es decir, aquellas superficies de doble curvatura y en el mismo sentido.

Los modelos suspendidos parten del concepto de catenaria definida como la curva que describe una cadena suspendida por sus extremos. La cadena toma por si misma una forma curva, bajo la acción de cargas constantes verticales, con lo cual la ecuación de equilibrio de la catenaria se puede definir como lo indica la figura 1.

Figura 1  
Ecuación de equilibrio de la catenaria

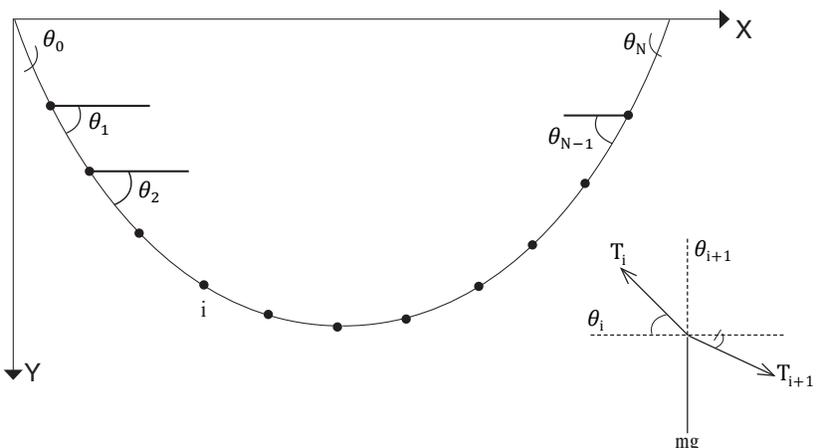
Cada punto estará sometido a tres fuerzas: su propio peso, la fuerza que ejerce el hilo a su izquierda y a su derecha. La condición de equilibrio para cada punto *i* de masa *m* se expresa:

$$T_i \cos \theta_i = T_{i+1} \cos \theta_{i+1}$$

$$T_i \sin \theta_i - T_{i+1} \sin \theta_{i+1} = mg$$

Fuente: Elaboración propia

Catenaria descrita por una cadena



### Estructura transformable de mallas con barras plectadas

Como hipótesis de partida se puede asumir que la carga es proporcional al peso propio de la cadena, por lo que la línea de presiones toma la forma de una catenaria (línea de los cosenos hiperbólicos), por lo cual se infiere que la cadena, bajo una carga, se deforma aumentando su curvatura en el punto en que esta carga actúa. La curvatura de la cadena, entonces, variará según la posición e intensidad de la carga que actúe sobre ella.

Es por esto que la forma final de una malla suspendida configurada por pequeñas barras y nodos es semejante a una cadena de eslabones articulados, de igual medida y peso, conectados entre sí. Este modelo simula una malla de madera que resiste tensiones de compresión, pero en la malla suspendida, ocurren tensiones de tracción solamente y debido a que se encuentran bajo cargas muertas (peso propio) están libre de momentos. Para invertir y encontrar las coordenadas del modelo se realizó un proceso de fotogrametría (figura 2).

En otro artículo titulado "Calculation of the Shell", ya citado, el ingeniero Edmund Happold (1976), colaborador en el cálculo estructural de las cubiertas de mallas, afirma: "Los modelos colgantes son modelos funiculares que sólo contemplan peso propio y no resultan de las cargas de flexión. En la práctica la malla es sometida a cargas más grandes que el peso. Las deformaciones producidas por las cargas externas cambian la forma de la malla original funicular. Las fuerzas directas desde las cargas del funicular producen momento de flexión, el cual incrementa los momentos".

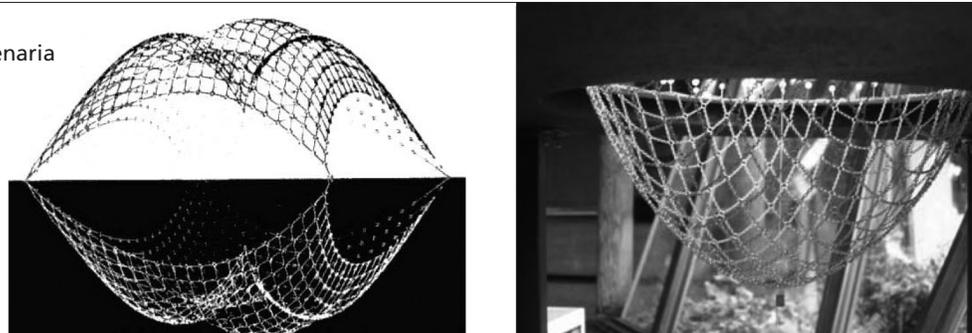
Las observaciones realizadas por Happold son para este trabajo particularmente importantes, ya que ubican el problema en las desavenencias que pueden existir entre

el método del modelo colgante para obtener la forma y el método para construirlas. En otro artículo titulado "An example of the staticanalytical computation for a suspended model" IL-10 publicado años antes por el profesor Lothar Gründig (1974) aclara con mayor nitidez este problema de los esfuerzos iniciales de la malla y además plantea la incidencia que tendrán los aspectos constructivos dentro del mismo: "Los momentos de torsión y flexión debidos a la rigidez de las barras de la malla, con seguridad no pueden ser despreciados... además de determinar los esfuerzos, también hay que considerar otros factores que pueden influir en la forma tales como: los aspectos constructivos de los nodos, tipo y material de cubierta y de las barras, método de montaje, entre otros. Teóricamente, la forma obtenida al deformar la barra está muy cerca de la catenaria obtenida en el modelo colgante, debido a la poca sección de las barras, pero nunca será igual a la forma obtenida en el modelo colgante debido a que son curvas de flexión, por lo que, la forma colgante, no podrá ser utilizada para el análisis estructural de los esfuerzos".

Esto demuestra, por lo menos en teoría, que la inversión práctica de la forma obtenida con el modelo funicular no es posible con estructura de elementos rígidos, ya que mientras en el modelo funicular los hilos flexibles (cadenas) se curvan formando una catenaria, los listones de la cúpula construida se deforman según curvas de flexión. La rigidez propia de los listones, inicialmente planos, proporciona una gran resistencia a la estructura cupular, con lo cual, no siempre todo lo que sucede en la tracción sucede en la compresión.

Es en este último aspecto donde este trabajo hace aportaciones: demostrar que la flexión inicial inducida en las barras puede ser utilizada como estrategia para otorgar rigidez y estabilidad a la estructura final. Es por ello que este trabajo analiza el comportamiento estructural de

Figura 2  
Modelos colgantes por catenaria



Fuente: ILEK

la malla para verificar que esta flexión inicial no se traduzca para la estructura en roturas, colapsos, ni a zonas plásticas en el material, relacionando el proceso de búsqueda de la forma con los esfuerzos iniciales de la deformación de la malla, las propiedades del material, el proceso de montaje y los detalles constructivos. Considerar las sucesivas flexiones que suceden en la barra durante el proceso de deformación, significa que la forma dependerá de las características del material, de la sección y longitud de la barra, y de la carga externa aplicada para lograr la deformación a los efectos de la preflexión.

### Fundamento geométrico del método por curvas de flexión como estructuras transformables

Cuando la malla es plana la celosía es un mecanismo articulado. A pesar de ello el nodo presenta fricción entre las barras que se mueven paralelamente entre sí, deformando cada cuadrado en rombo resulta que la malla se comporta como un paralelogramo. Este movimiento causa cambios en la longitud de la diagonal entre los nodos, donde dos de ellos se alejan (B y E) del centro (A) y dos de ellos se acercan (C y D) al centro (A). Las deformaciones significativas de la malla y los cambios en los ángulos entre las barras indican que la forma inicial fue alterada para conformar la doble curvatura, por tanto estos puntos no son coplanarios (figura 3).

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

El método deberá tomar en cuenta:

1. Propiedades mecánicas de la barra
  - Módulo de elasticidad, Módulo 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.

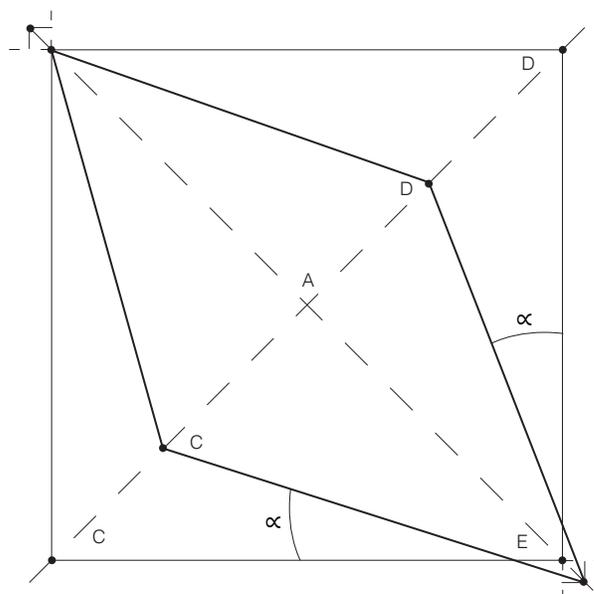
En términos globales la estructura debe cumplir los siguientes aspectos:

1. La condición de equilibrio donde las fuerzas en cada nodo 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.

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

Para la comprobación del método elaboramos modelos físicos experimentales a escala 1:10 en diferentes materiales (acero, madera y plástico) que nos permitieran encontrar las coordenadas de la cubierta, estudiar

Figura 3  
Esquema geométrico



Fuente: Elaboración propia

el método de erección y sus implicaciones constructivas, la estabilidad estructural y la capacidad transformable de la malla. Los cuatro nodos centrales están fijos en el eje Z ya que están apoyados sobre un estructura y el resto esta sin restricciones para lograr la deformación tal y como lo muestran las figuras 4 y 5).

**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 nodos si no hay separadores.
- Los perfiles huecos tienen mayor inercia y presentan mayor resistencia a la deformación, pero se traduce en mayor rigidez de la malla final.

Las barras de material plástico ofrecen ventajas a la estructura por ser muy flexibles, con altas resistencias y con una relación ventajosa en cuanto a peso/área cubierta, condición muy favorable a la hora de utilizarlas en una estructura transformable. En el proceso de deformación la transferencia de fuerzas entre los componentes estructurales se produce a través de la presión que ejerce un elemento sobre el otro, con lo que es previsible que las tensiones tiendan a incrementarse en los nodos.

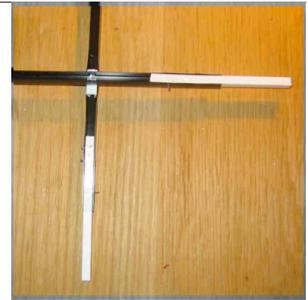
Un aspecto que permitió estudiar el modelo físico fueron los diferentes ángulos de los rombos de la malla deformada (ver en figuras 6 y 7). Estos ángulos van cerrán-

Figura 4  
Características del modelo físico experimental

Retícula: Malla formada por un damero cada 160 mm (en escala cada 1 m) formada por 6 barras en las dos direcciones.



Bases: Barra maciza de perfil cuadrado de 5 mm x 5 mm para encajar en los extremos de la barras en "U", con un terminal de aro como anclaje.



Nudos: Formados por tornillos pasantes, arandelas y tuercas para generar presión sobre un trozo de perfil "U" encargado de unir las dos barras de perpendiculares colocado en el sentido inverso de las "U" de las barras.



Barras: Perfil "U" de plástico poliéster de 5 mm x 5 mm. perforadas cada 160 mm. Longitud simulada: 6 m Longitud real: 1 m Escala del modelo: 1:6 Ø simulado 30 mm.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5  
Proceso de deformación del modelo físico experimental



Fuente: Elaboración propia

dose en la medida que se acercan a las esquinas perimetrales de la estructura, partiendo desde la configuración cuadrada, con ángulos de 90° en la cresta de la cúpula, hasta la configuración más cerrada que es un rombo con ángulos agudos de 63° en sus vértices en la periferia, cumpliéndose, de esta manera, el enunciado geométrico general para la obtención de la forma explicada al principio.

A este modelo físico se le colocó la membrana anti-clástica (superficie de doble curvatura en sentidos opuestos) tipo conoide, colgada de la cresta de la cúpula y unida a los bordes perimetrales para comprobar que la pretensión podía aportar la rigidización globalmente de toda la estructura y así, cada material aporta de acuerdo a sus características para lograr el equilibrio de fuerzas.

Al finalizar este proceso pudimos observar como las tensiones en la membrana tienden a concentrarse en el punto alto y en las cuatro esquinas, así como también que existe un punto de equilibrio entre la pretensión de la tela y las barras, puesto que si una de las dos (membrana y malla) excede en tensión la malla de barras preflectadas comienza a deformarse irregularmente.

Hasta este momento sólo se conocían las coordenadas de la forma y sus ángulos y se desconocía la carga exacta que hay que aplicar para deformar la malla y la flexión inicial

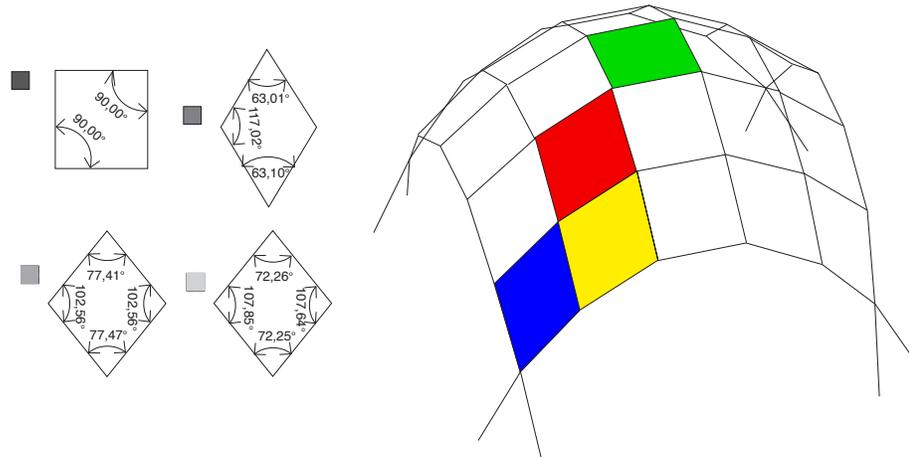
que produce esta carga. Para despejar estas incógnitas realizamos la simulación del mismo modelo por computadora.

### 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, programa de elementos finitos interactivo que calcula la forma a través del método de la densidad de la fuerza y un algoritmo usado para calcular estructuras de grandes deformaciones donde un área puede relajarse o aflojarse ante una fuerza externa y establece que la ecuación de una malla de doble curvatura es el resultado de la condición de equilibrio de cada nodo. Esta ecuación para cualquier punto "i" en cualquier lugar de la malla puede ser descrita como la estrategia que ilustra la figura 8.

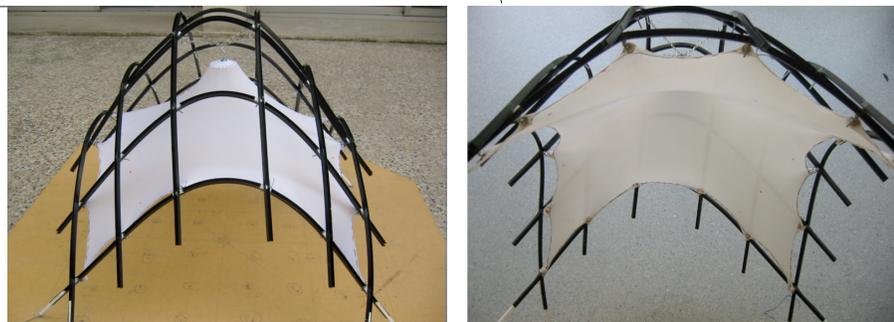
Hay que destacar que los ingenieros que desarrollan el programa Easy habían participado en el cálculo de los modelos colgados realizados en el Instituto de Ingeniería Geodésica conjuntamente con el Instituto de Estructura ligeras (IL) ambos de la Universidad de Stuttgart. Sin embargo, era la primera vez que el equipo, que asesoró el proceso de obtención de la forma para este trabajo, jun-

Figura 6  
Modelo físico con membrana textil



Fuente: Elaboración propia

Figura 7  
Modelo físico con membrana textil



Fuente: Elaboración propia

to con los tutores y el autor, participaba en la realización de los cálculos del proceso de obtención de la forma por plectación de las barras, lo cual significó la realización de pruebas para ir descartando posibles resultados y efectos no deseados. Las propiedades asignadas a los nodos tuvieron que editarse manualmente hasta lograr la simulación correcta, ya que el programa no contempla herramientas para realizarlo, como se dijo anteriormente. Siempre se tomó como referencia importante la mecánica del modelo físico en su proceso de deformación. Lo que se presenta en este apartado es un resumen de los pasos realizados.

Para que el modelo matemático simulara que la malla está conformada por nodos y barras pasantes y continuas, se separaron otorgándole a cada nudo un doble punto de giro (rot y rot') en los ejes x,y,z unidas por un resorte, tal como se indica en la figura 9.

Para efectos de la simulación se trabajó con datos de tubos de plástico reforzado con fibras de vidrio.

Tal y como se hizo en el modelo físico se colocaron restricciones en los cuatro nodos centrales evitando

su desplazamiento en el eje "Z" y permitiendo el giro en los ejes "X" y "Y".

**Resultados:**

Una vez construido el modelo con todas sus características y propiedades mecánicas y físicas (cuadros 1 y 2), se realizó el proceso de deformación de la malla, el cual consistió en aplicar a los nodos terminales, ubicados en los extremos de las esquinas, una carga que fue incrementándose hasta llegar a la relación arco-flecha igual a la obtenida en el modelo físico, es decir con una flecha de  $f=2,10$  m, una flexión máxima inicial de  $0.359$  KN con una carga  $2,40$  KN (cuadro 3 y figura 10).

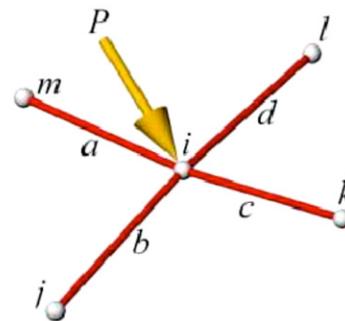
El valor de la flexión inicial, representado en la zona roja distribuida sobre el arco, depende del módulo de elasticidad del material, de las propiedades geométricas de la sección transversal de las barras y de la rigidez de las uniones en sujetar las barras para que no se produzcan desplazamientos. Se obtuvo una cúpula con una altura máxima de  $3,26$  m (cuadro 4).

Figura 8  
Ecuación Densidad de la fuerza

$$\frac{X_i - X_j}{L_a} S_a + \frac{X_i - X_k}{L_b} S_b + \frac{X_i - X_l}{L_c} S_c + \frac{X_i - X_m}{L_d} S_d + P_{ix} = 0$$

$$\frac{Y_i - Y_j}{L_a} S_a + \frac{Y_i - Y_k}{L_b} S_b + \frac{Y_i - Y_l}{L_c} S_c + \frac{Y_i - Y_m}{L_d} S_d + P_{iy} = 0$$

$$\frac{Z_i - Z_j}{L_a} S_a + \frac{Z_i - Z_k}{L_b} S_b + \frac{Z_i - Z_l}{L_c} S_c + \frac{Z_i - Z_m}{L_d} S_d + P_{iz} = 0$$

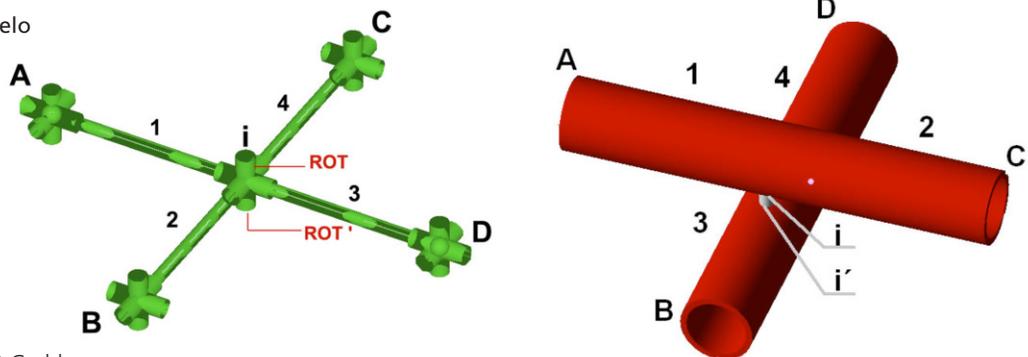


Donde:

$x,y,z$  = coordenadas  $L_{a,d,c,d}$  = longitud de la barra  $P$  = carga externa  $S$  = fuerza de la barra

Fuente: Technet GmbH.Stuttgart

Figura 9  
Construcción del modelo por computadora



Fuente: EASY® Technet GmbH.

Cuadro 1  
Propiedades de la sección

Longitud de barras entre nudos (m)	1
Sección (mm)	Diámetro exterior (D)= 32 Diámetro interior (d)= 26
Espesor (mm)	3
Longitud (m)	6

Fuente: Datos suministrados por el fabricante NIOGLAS.

Cuadro 2  
Propiedades mecánicas de la barra

Módulo de elasticidad (KN/m <sup>2</sup> )	2,3 x 107
Resistencia a la rotura (KN/m <sup>2</sup> )	6,5 x105
Resistencia a tracción (KN/m <sup>2</sup> )	4x105
Densidad	1.650 Kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Datos suministrados por el fabricante NIOGLAS.

Cuadro 3  
Carga para la deformación inicial

Carga final aplicada a los nudos (KN): 0,30	Cantidad de Nudos (Unidad): 8
Total de carga aplicada (KN): 2.40	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4  
Resultados dimensionales

Altura Total Cúpula (m)	3,26
Flecha del arco (m)	2,14
Distancia entre apoyo (m)	4,90
Relación Luz/flecha	2,28

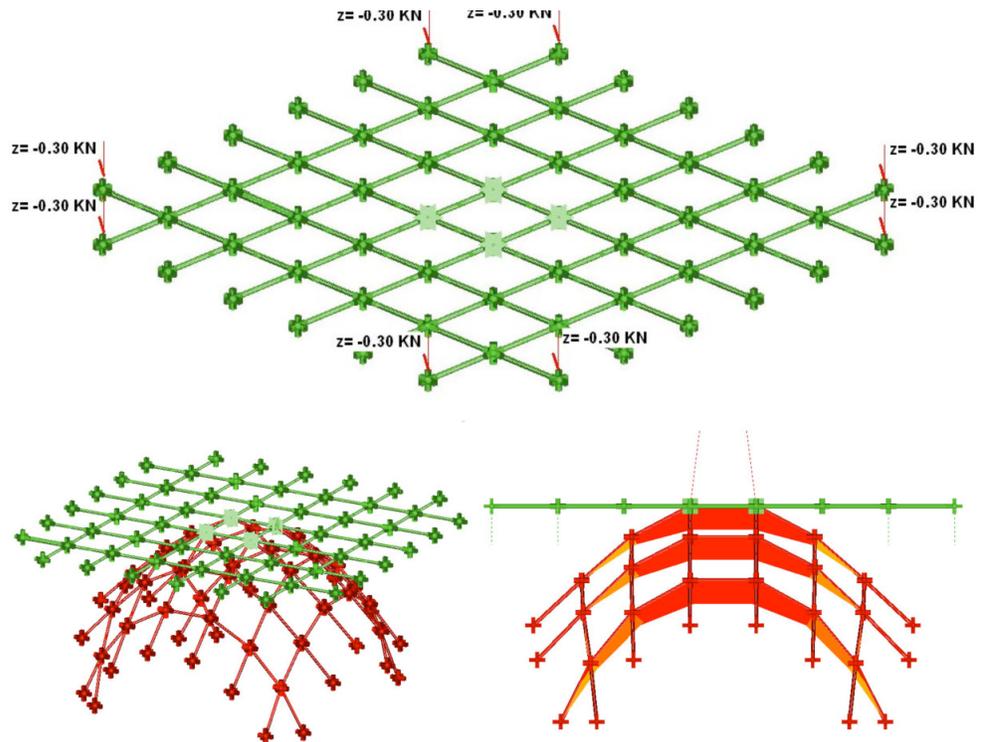
Fuente: Elaboración propia.

La forma encontrada no se puede relacionar con una bóveda por rotación ni por traslación, ya que la deformación y la disposición de las barras no presentan simetría radial y los arcos no son paralelos, ya que responde a curvas de flexiones distintas.

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

Como se muestra en las figuras 11 y 12 los nodos de la base, si están unidos mediante una diagonal, éste entra en tensión y las fuerzas se anulan. Por lo tanto la resultante es cero con lo cual obtendremos una estructura totalmente en equilibrio, que comprende los esfuerzos de la preflexión inicial y el peso propio de la estructura. Es de

Figura 10  
Introducción de la carga de preflexión modelo por computadora



Momento de Flexión Máximo: =0.359 KN

Fuente: EASY® Technet GmbH.

observar que los valores iniciales de preflexión se mantienen al colocar como riostramientos los tensores en la base.

do así la colocación de diagonales entre los rombos de la malla plectada.

**Reacción = 0**

Para el diseño de la membrana pretensada anticlásica se estableció su forma partiendo de los puntos generados por las barras para que pudiera unirse con los arcos del borde, en los puntos intermedios y en la cresta de la cúpula.

**Esfuerzo de flexión inicial y con membrana**

Como se observa en la figura 14 la preflexión inicial (0.359 KN) más la pretensión de la membrana no compromete el límite de rotura del material en virtud de que consume un 33,33% (216,65 N/mm<sup>2</sup>) de su capacidad, estando las barras críticas donde la membrana se une con las barras plectadas (figura 15).

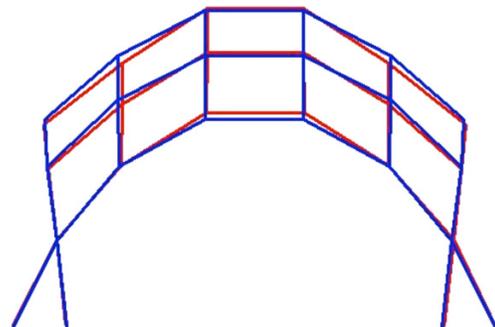
**Colocación de la membrana pretensada**

Una vez sometida a pretensión la membrana se encuentra en 0,32KN/m y se observó que el incremento en la preflexión inicial no fue significativo (figura 13), con lo cual se infiere que su aporte es a tracción evitan-

do así la colocación de diagonales entre los rombos de la malla plectada. Esta comparación entre la preflexión 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 diagona-

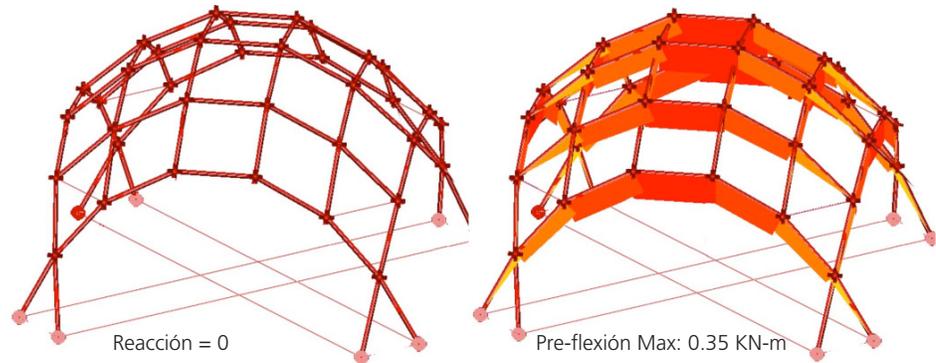
Figura 11  
Comparación entre las coordenadas modelo computarizado y modelo físico

Línea roja: modelo físico  
Línea azul: modelo computarizado



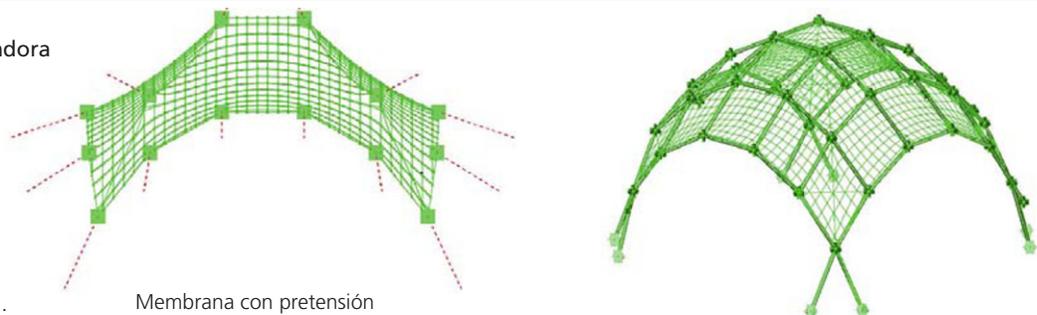
Fuente: Elaboración propia

Figura 12  
Reacciones en los anclajes



Fuente: Elaboración propia

Figura 13  
Modelo por computadora barras y membrana



EASY® Technet GmbH.

Membrana con pretensión

les distribuidas en toda la superficie. Como lo muestra la figura 16, del total de la tensión de la barra crítica 86,06 %corresponde a la preflexión y sólo 13,90% pertenece a la pretensión de la membrana.

El peso propio del módulo es el especificado en el cuadro 5.

Cuadro 5

**Peso propio del módulo**

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>

Fuente: Elaboración propia.

**Análisis ante una carga externa de viento**

El objetivo de realizar esta simulación fue determinar las deformaciones de la estructura, los movimientos de los nodos y las tensiones de las barras críticas para comprobar que la estructura no supere su límite de rotura y entrar en colapso. A manera de ejemplo se presenta una sola hipótesis (viento a 90°). Para determinar los coeficientes de presión se realizó un estudio en el túnel de viento. Se introdujeron 17 casos de carga, actuando sobre la superficie de acuerdo al factor de carga, que es el producto

Figura 14  
Modelo por computadora  
barras con membrana  
y la preflexión

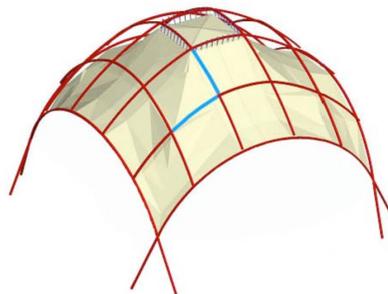


EASY® Technet GmbH.

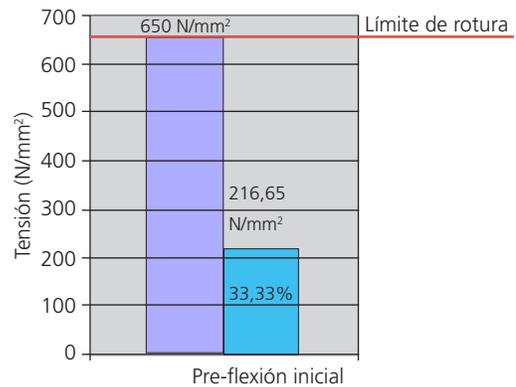
Pre-flexión máxima inicial: 0.31 KN

Pre-flexión máxima+pretensión: 0.329 KN

Figura 15  
Tensión crítica de la malla  
pre-flectada

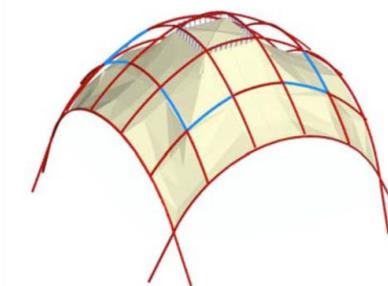


Ubicación Barra crítica en la malla

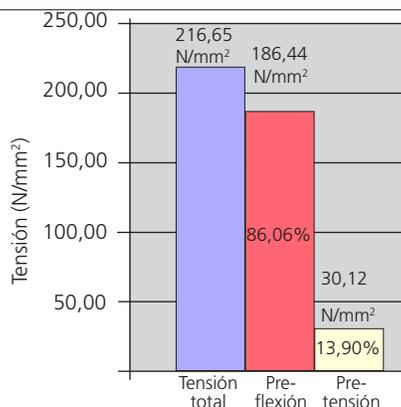


Fuente: Elaboración propia

Figura 16  
Tensión crítica  
de la malla pre-flectada  
mas membrana pretensada



Ubicación barra crítica en la malla



Fuente: Elaboración propia

entre la presión dinámica ( $50 \text{ Kg/m}^2$ ) y el coeficiente de presión indicada en el ensayo de túnel de viento a  $100 \text{ Km/h}$ .

Para el análisis de la estructura se utilizó el programa comercial EASY® v8 (Technet-Stuttgart). La deformación de la estructura está referida a los movimientos en los nodos por los desplazamientos que se producen en el eje X, en el eje Y, y en el eje Z, así como también los giros alrededor de los ejes X, Y, Z. Las cargas estuvieron repartidas en las barras y en la superficie de la membrana. Otro aspecto a considerar es que la simulación se realizó con laterales cerrados.

### Deflexión en la malla

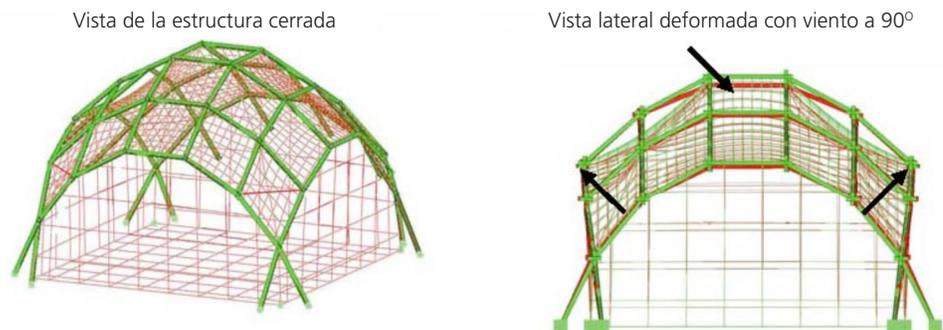
Se entiende como deflexión la distancia de separación de los componentes de la estructura a partir de sus posiciones originales sin cargas externas. La deformación total de la estructura se orienta hacia la misma dirección de la carga de viento. En la figura 17 se muestra a la izquierda el modelo sin carga y a la derecha se representa la deformación al aplicarle la carga perpendicular a la superficie de la membrana.

Como resultado tenemos unos desplazamientos máximos en los nodos con un total de  $11 \text{ cm}$  por la presión del viento sobre la cresta y en los arcos perimetrales; y la deflexión causada por la succión alcanza un desplazamiento de  $5 \text{ cm}$ . Hay que mencionar que esta estructura presenta grandes deformaciones, por lo que se consideran los cambios de forma de la cubierta importantes, y los desplazamientos significativos.

Como se puede observar en la figura 18 la preflexión aumenta en un  $33,3\%$  a un  $36,5\%$  con la carga de viento, este incremento en sí no es significativo. Es decir, la preflexión está actuando como rigidización de la estructura en su totalidad. Otro aspecto a destacar es que este valor de la flexión demuestra que el material está trabajando por debajo de su límite de rotura, por lo que se infiere que el comportamiento general de la estructura es elástico.

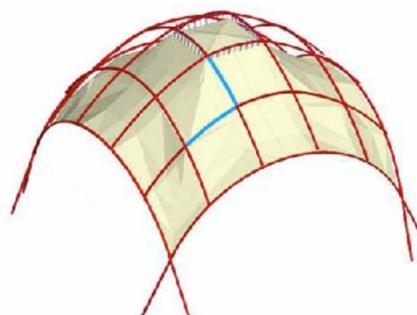
Para comprobar los resultados obtenidos y verificar el método de obtención de la forma por curvas de flexión realizado tanto en los modelos físicos como en los simulados por computadora, se construyó un prototipo a escala real con las mismas características de la malla deformada por computadora arrojando resultados altamente satisfac-

Figura 17  
Deflexión de la malla

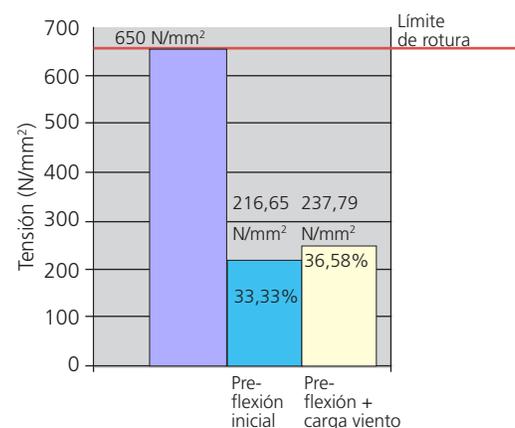


Fuente: Elaboración propia

Figura 18  
Tensiones con carga externa de viento



Fuente: Elaboración propia



torios, que además permitió resolver los detalles constructivos de los nodos, anclajes, unión de la membrana con la estructura y comprobar todo el proceso de erección de la estructura (figura 19).

**Nodos**

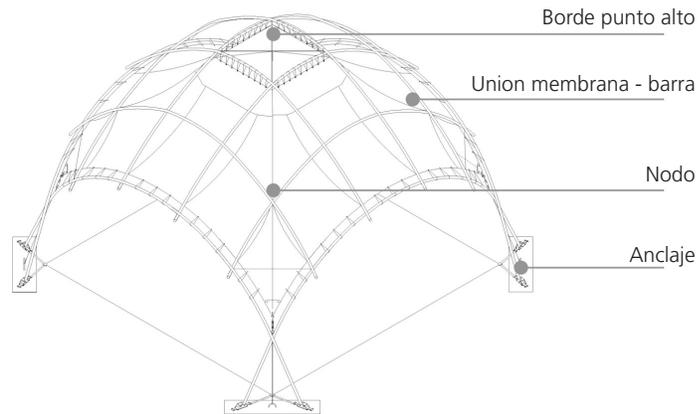
Los nodos fueron diseñados para presionar la barra entre sí debido a que el material no era posible perforarlo por sus características de plástico frágil, por lo que se utilizaron abrazaderas con sistema tipo clips con aislante, necesitando menos operaciones para el armado de la malla, permitiendo acoplarse a un rango de secciones, poseer buena resistencia a la tracción y tener, además,

un sistema de rosca interno para la conexión con la otra barra. Estas abrazaderas van 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. Para ello los platos disponen de una plancha metálica con ranura circular que abarca cualquiera de las posiciones finales del nodo dentro de la malla (figura 20).

**Barras**

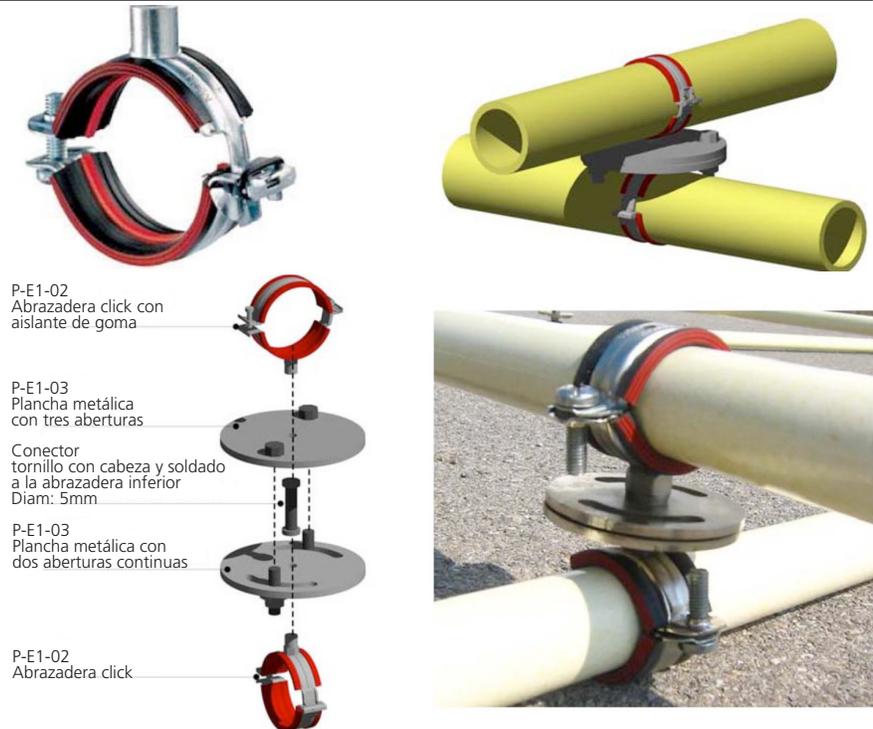
Las barras son de plástico reforzado con fibra de vidrio óptimo para una estructura transformable que debe ser ligera. También se puede señalar el excelente compor-

Figura 19  
Diseño del prototipo



Fuente: Elaboración propia

Figura 20  
Diseño del Nodo



Fuente: Elaboración propia

tamiento estructural de los perfiles de PRFV que, aunque frágil, es un material adecuado para 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.

Por otra parte, la longitud comercial 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.

Los terminales de las barras de las esquinas son de plástico macizo como transición entre el perfil del PRFV y la base metálica, la cual cuenta con un sistema telescópico de nivelación con tubos de acero. Este terminal en acero de las barras de los arcos contribuye con un peso inicial para el proceso de deformación (figura 21).

### Bases y anclajes

La bases, ubicadas luego del terminal de las barras del borde, son articuladas con giro en un sentido (asegurado por el pasador) y en 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 conformada por la base giratoria, separadores y pernos de unión (figura 22).

La base está compuesta por 3 piezas metálicas: la primera es un tubo que se conecta a la barra maciza de PRFV que lo penetra. A este tubo, se le conecta una pieza de transición conformada por un pequeño tubo metálico roscado de menor tamaño para permitir giros en el sentido horizontal, y a este tubo se unen unas planchas para unirse a la base en forma triangular que tiene un agujero para articular la base durante el montaje y una ranura circular para poder colocar otro tornillo al concluir el proceso de montaje y adaptarse ángulo final con lo cual queda

Figura 21  
Barras y terminales de las barras

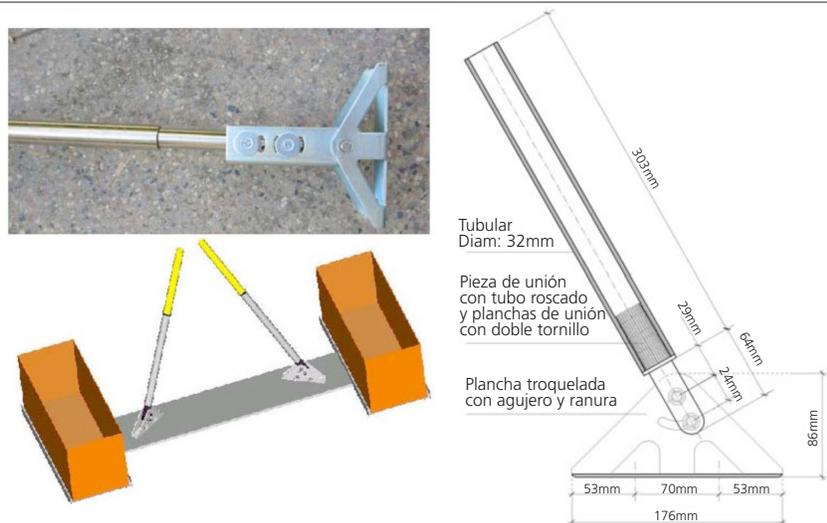


Fuente: Elaboración propia

Terminales de barras de borde



Figura 22  
Bases



Fuente: Elaboración propia

totalmente fijo en punto. Esta base tiene dos agujeros ovalados para unirse con la plancha que contiene los pesos.

Los anclajes son de planchas de aluminio estrellado y 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 plegar la estructura. La plancha cuenta con unas aberturas con separaciones de 80 y 70 centímetros para recibir las bases de la malla. El peso superficial es de dos piezas por cada anclaje de concreto, de 40 kg cada uno, para un total de 80 kg por base, alcanzando un total de 640 kg. Esta pieza va conectada a la base giratoria a través de 3 tornillos cabeza plana de 12,5 mm. (figura 23).

**Unión entre la membrana y barras**

La unión del borde de la tela con el arco perimetral de la malla plegada es a través de tiras de plástico Tirrak, colocadas al borde de la tela, con ojetes metálicos

por donde pasar este tensor de plástico que va a buscar la barra y a la vez tensar y sujetar la membrana.

El punto de unión de la membrana textil con el interior de la malla plegada es a través de un gancho de terminal abierto con doble sistema de roscado para poder tensar la membrana. En la membrana se colocará un refuerzo de láminas de plástico agujereadas para introducir el gancho y poder tensar la membrana en este punto y evitar la aparición de arrugas producto de imperfecciones en la fabricación o desplazamientos en el montaje (figura 24).

**Armado de la malla**

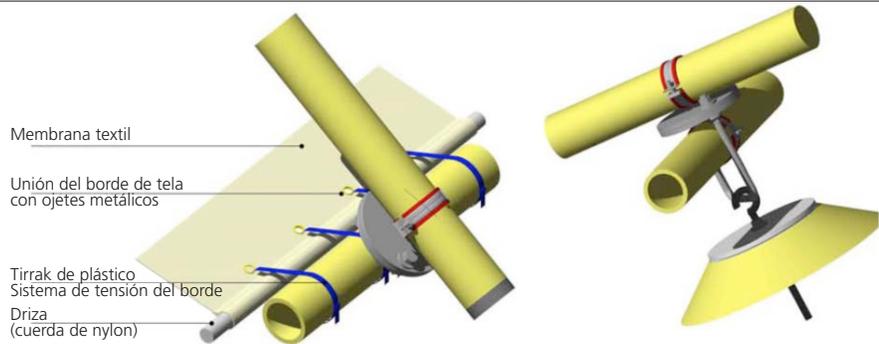
Para armar la malla se procede primero a colocar las barras y nodos centrales en ambos sentidos, seguido por la colocación de las barras inferiores en un sentido y colocación de todos los nodos. Seguidamente se colocan las barras superiores y se concluye el armado apretando los nodos con el sistema clips (figura 25).

Figura 23  
Anclajes



Fuente: Elaboración propia

Figura 24  
Unión entre la estructura y la membrana



Fuente: Elaboración propia

Figura 25  
Armado de la malla



Fuente: Elaboración propia

**Comprobación del primer nivel de transformabilidad de la malla**

En este primer nivel de comprobación los nodos funcionaron perfectamente haciendo plegar la malla hasta su posición totalmente cerrada para ser transportada y abierta posteriormente para ser montada en el sitio. La longitud total de la malla plegada es de 12 m. (figura 26).

**Proceso de erección**

El proceso de erección se realizó con grúa y dentro de sus ventajas están:

- 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).

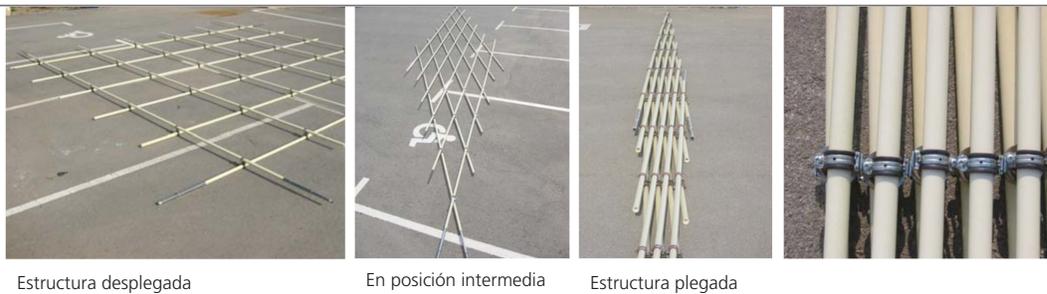
- Requiere máximo de cuatro operarios o menos (figuras 27 y 28).

Uno de los principales problemas que se tuvo que solucionar durante el proceso de montaje fue cuando la cúpula perdió la flexión de las barras internas al descolgarla de la grúa-pluma. Esto se debió a que las abrazaderas con el sistema clips no transmitieron suficiente presión sobre las barras, permitiendo que se deslizaran a nivel de los arcos de borde, presentando desplazamientos entre los 20 a 30 centímetros (figura 29).

**Pérdida de la geometría y la preflexión**

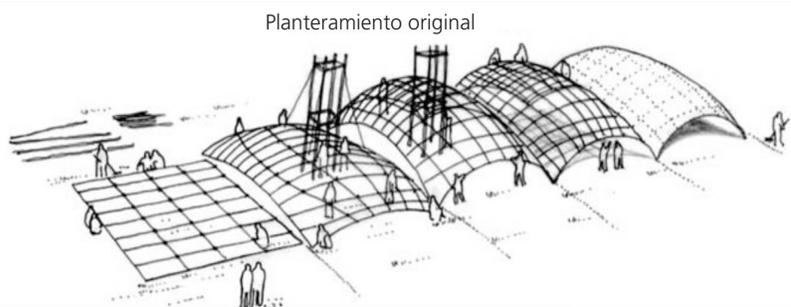
El rediseño consistió en asegurar que el nuevo nodo no permitiera a la barra desplazarse perdiendo así su eje. Se confinaron los nodos agregando a ambos lados de la abrazadera unos topes de plástico, encolados con resi-

Figura 26  
Primera transformabilidad de la malla



Fuente: Elaboración propia

Figura 27  
Boceto inicial del proceso de montaje



Fuente: Elaboración propia

Figura 28  
Proceso de erección del prototipo



Fuente: Elaboración propia

na. Los topes son de sección más pequeña que la barra para aplicar presión, por otra parte se encoló con el mismo pegamento de resina un forro de goma a la abrazadera para que no se desprendiera del aro metálico de la abrazadera. Todos estos cambios se realizaron con el objetivo de aumentar el roce entre la barra y el nodo sin alterar considerablemente el aspecto del nodo tal y como se muestra en la figura 30.

**Rediseño del nodo**

En esta segunda oportunidad, una vez retirada la grúa, los nodos funcionaron muy bien al no permitir el desplazamiento de la barra, preservando su preflexión. Se

bloquearon los nodos con tornillos y tuerca y se eliminó el movimiento de rotación o giro del nodo que quedó en la posición correcta y sin presentar deformaciones ni excentricidades entre las barras. Los elementos de tope y aumento de roce funcionaron y no permitieron que la barra se deslizara a través de la abrazadera (figura 31).

**Resultado final del prototipo**

El resultado final fue una cubierta de un peso total/área cubierta de  $3,57 \text{ Kg/m}^2$ , lo que significa que se obtuvo una estructura muy ligera. Las luces obtenidas en el prototipo son iguales a las teóricamente estimadas, mientras que las alturas presentan una diferencia de 9,3 % entre los

Figura 29  
Pérdida de la geometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 30  
Nueva propuesta de nudo con topes



Fuente: Elaboración propia

Figura 31  
Prototipo final construido



Vista de la estructura pre-flectada

Fuente: Elaboración propia

distintos modelos realizados y el prototipo. Esto se debe al asentamiento de la estructura que, una vez terminada, re-equilibra las fuerzas, abriendo los arcos del perímetro y descendiendo la cúpula.

### Aplicaciones sugeridas

En el campo de las estructuras de rápido montaje se puede considerar que este trabajo constituye un aporte para la construcción de refugios temporales. Se definen como cubiertas mínimas, ligeras, modulares y sistematizadas que pueden ser dedicadas a cualquier actividad que necesite resguardo o protección de manera temporal. Debe satisfacer, por una parte la condición de abrigo y protección y, por la otra, participar en el entorno en que será puesto, así como también poseer implementos para su anclaje y garantizar estadía en el lugar.

En términos generales, un refugio puede desempeñar las siguientes funciones:

- Ofrecer protección contra los factores ambientales.
- Proporcionar almacenamiento a pertenencias y bienes.
- Marcación de propiedad de territorios para su resguardo o vigilancia.
- Establecimiento de centros comunales.
- Proporcionar intimidad.
- Proporcionar resguardo a personal o a equipos.

Los refugios pueden ubicarse principalmente en dos áreas: la primera, si consideramos el refugio como un objeto modular prefabricado compatible entre sí y cuya combinación permite crecer por sumatoria, para lo cual habría que desarrollar accesorios que permitieran su implemen-

tación como una tienda con características dependientes de la zona climática donde se quiera ubicar (figura 32).

Se puede mencionar como principales accesorios las fachadas de cerramientos laterales, anclajes y sobrecubierta.

La otra área de aplicación podría ser su implementación en el campo de las estructuras de rápido montaje como método constructivo, pudiéndose realizar cubiertas transformables con materiales de cada localidad que cumplan con la condición de tener capacidad para ser flectados.

Como ideas a desarrollar se proponen aplicaciones exploratorias del módulo, donde la estructura plectada se aplica como refugio modular de rápido montaje que incluye la incorporación de elementos laterales de protección como:

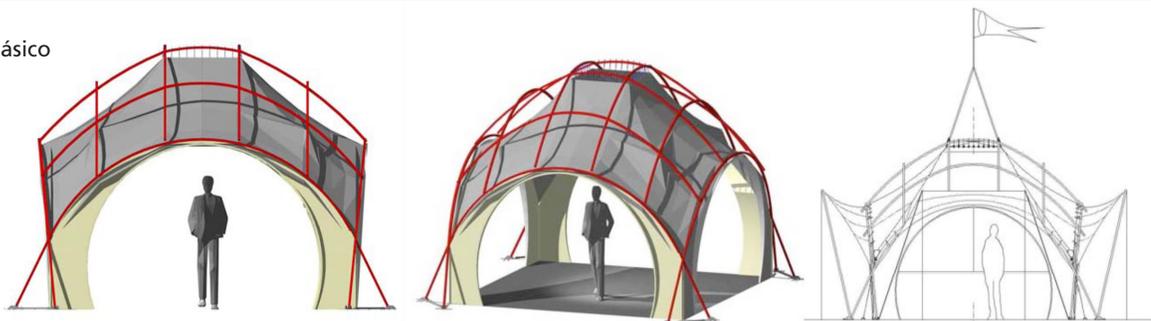
- Fachadas laterales
- Accesos y ventanas
- Piso textil, que sustituye los cables o cintas de arriostre inferiores

A continuación se presentan las alternativas de aplicación destacando sus dimensiones y áreas.

### Combinación de crecimiento a partir del módulo básico

El carácter y la condición modular es muy importante, ya que puede, por la adición de varios módulos, obtener un gran espacio cubierto. Tal y como se comenta en artículo titulado "From small parts to large structure" de Marijke Mollaert (2001), donde se define que: "... Una unidad básica y elemental de tienda puede generar

Figura 32  
Módulo básico



Dimensiones  
4,40 x 4,40 mts

hT 3,20 mts

Área Útil 16 m<sup>2</sup>

Área Total de ubicación: 25m<sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

grandes envolventes. Estas áreas pueden ser cubiertas por composición y repetición del módulo básico (...) cada módulo se soporta a sí mismo conectado por elementos de transición...”.

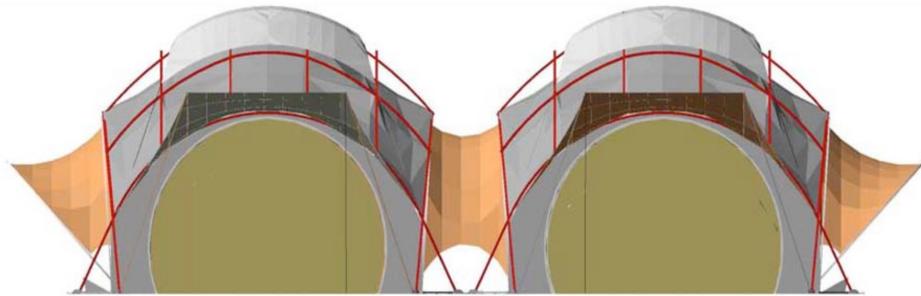
Esto indica que para el crecimiento y combinación del módulo es necesario unas zonas de transición que conecten los módulos y ofrecer las mismas prestaciones de resguardo y protección a la intemperie que el módulo en sí. La unión entre módulos de la cubierta experimentada se realiza a través de una conexión textil entre los arcos de los accesos permitiendo el crecimiento en los dos sentidos y continuidad espacial (figura 33).

El crecimiento horizontal en ambos sentidos se plantea por agregación de módulos. En la alternativa aquí descrita se proponen cuatro módulos partiendo del módulo base, conectados por los arcos laterales. En el centro de los cuatro módulos resulta un espacio que puede ser aprovechado para la ventilación del área cubierta o para colocar equipos que necesiten resguardo o exponerse y estar en contacto con el aire al exterior (figura 34).

Estas alternativas buscan demostrar que el módulo obtenido puede ser usado en diferentes funciones y combinaciones abarcando una gama bastante amplia de posibilidades de aplicación, así como también demostrar versatilidad de adaptarse a diferentes situaciones.

Estas alternativas de aplicación no sólo dependerán de la función a que se destine, sino también responderán a otras variables como las posibilidades de apoyo, que a su vez, dependen del tipo de terreno donde se ubicará el módulo, el medio de transporte, que puede variar según sea el caso de la accesibilidad y la variable más importante que es su frecuencia de uso, es decir el tiempo de permanencia de la estructura en funcionamiento. En la medida en que el tiempo de uso es menor las posibilidades de combinación entre los módulos se reduce por la cantidad de actividades que conlleva el montaje y desmontaje haciéndolo poco rentables, mientras que, cuando el tiempo de uso es mayor pueden generarse configuraciones de módulos más complejas y justificar la adición de accesorios o de componentes complementarios.

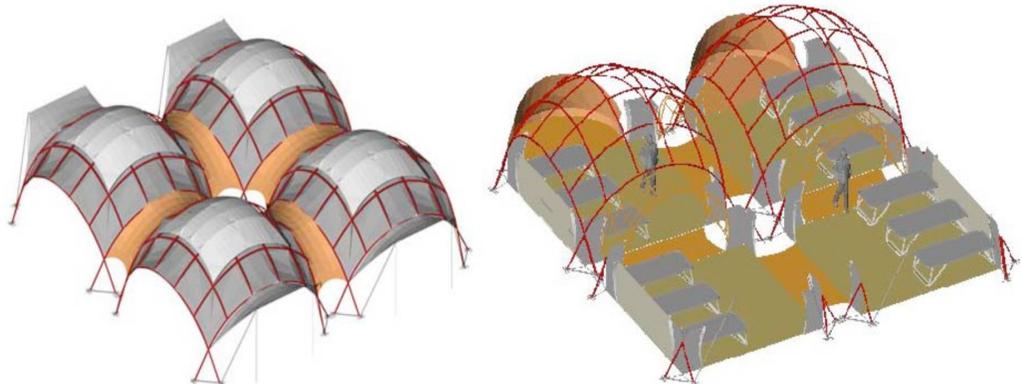
Figura 33  
Crecimiento lineal con dos o más módulos básicos



Área de transición: 3,40m<sup>2</sup>

Área útil total: 35,40m<sup>2</sup>

Figura 34  
Crecimiento en dos sentidos con cuatro módulos básicos



Área de transición: 13,60m<sup>2</sup>  
Área útil total: 87,20m<sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

El método de obtención de superficies curvas partiendo de mallas planas, bidimensionales con nodos articulados, en nuestro caso es el resultado de someter previamente las barras a flexión aplicando cargas de igual magnitud y sentido en los elementos de la malla. Así se deforma homogéneamente, generando la cúpula apoyada en cuatro puntos con cuatro arcos perimetrales de bordes. En este sentido, se comprobó en la investigación experimental la íntima relación forma-estructura.

Las estructuras resultantes por deformación siempre necesitan estar precargadas por lo que requieren de un sistema adicional para aplicarles las cargas, diferenciándose método y geoméricamente de las formas obtenidas con los modelos colgantes. Este método, como herramienta de diseño, presenta problemas no resueltos entre la forma de la cubierta y la manera de ser construida y montada por cuanto los componentes están formados por curvas catenarias sometidas únicamente a tracción, bajo la acción de su peso propio que no toma en consideración uno de los elementos importantes en el diseño de mallas deformadas, que son los esfuerzos iniciales que se generan en la barra al ser doblada y no suspendida. Consideramos que no contemplar dentro del cálculo geométrico de la forma estos esfuerzos iniciales puede explicar lo sucedido en los prototipos y cubiertas construidas en la década de los sesenta-setenta donde muchos nodos se fracturaron durante el proceso de montaje.

En el método de las barras plectadas la longitud de la barra, el diámetro y su peso son factores determinantes para la obtención de la forma y, por otro lado, definen la fuerza inicial que hay que aplicar para deformar

la malla, la luz a cubrir, la relación flecha/peso y la relación área cubierta/peso.

Desde el punto de vista geométrico, para que la malla sea una estructura transformable requiere pasar de la configuración de damero original de la malla plana a rombos en la malla deformada. Es importante señalar que al retirar la fuerza inicial las barras pueden volver a su estado original de damero plano, pudiendo ser reutilizadas sin perder sus características resistentes, con lo cual hace que el ciclo de vida de los elementos componentes se alarga gracias a su reutilización.

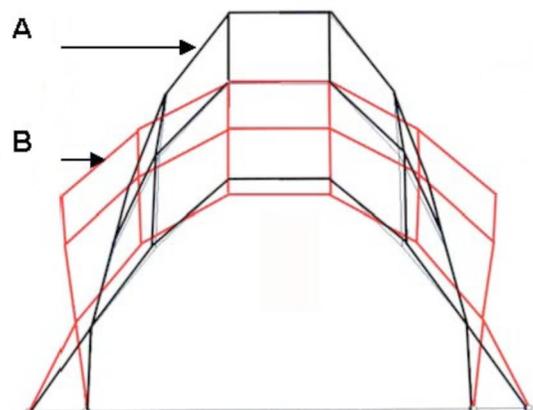
La figura 35 es una simulación computarizada que compara el resultado obtenido de deformar una misma malla con la misma carga.

La malla marcada con el literal "A", es una malla de hilos, la cual se deforma siguiendo la trayectoria de una catenaria. En la malla marcada con el literal "B" se caracteriza el material y su deformación por curvas de flexión (figura 35).

Esta comparación gráfica es importante destacarla, ya que expresa claramente los aportes de esta investigación. Es por ello que afirmamos que el método de curvas de flexión explica con mayor exactitud la mecánica de las estructuras plectadas que los métodos hasta ahora utilizados de los modelos colgantes, dado que son formas producto de la flexión y no de la catenaria. Como hemos mencionado, la malla debe su rigidez global a la flexión sobre el eje normal de las barras y a la rigidez de cada una de las uniones.

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

Figura 35  
Comparativa malla  
en modelo colgante  
y malla por curvas de flexión



Fuente: Elaboración propia

El funcionamiento del nodo satisfizo el proceso de apertura y cierre de la malla, permitiendo que ésta pase de la conformación geométrica de cuadrado (o damero) a rombos, exigencia indispensable que debía cumplir para ser una estructura transformable sin que se presenten desplazamientos importantes de las barras en los ejes "X" y "Y". Esto no se logra por si solo. Es necesario mantener la preflexión de la malla debido a que el acabado de la barra es bastante liso y permite al nodo deslizarse sobre la barra, por lo que se hizo necesario introducir elementos adicionales para aumentar el roce entre los dos componentes. En términos generales el proceso de montaje se llevó a cabo sin que se presentaran roturas en las barras.

Desde el punto de vista de su producción se puede mencionar que la solución modular sistematizada y repetitiva tiene sentido en un proceso de fabricación industrial seriada, cuyo volumen de producción redunde en costos competitivos que puedan ser amortizados en el tiempo. Respecto a este aspecto, hay que mencionar que la capacidad de la estructura de ser 100% reutilizable y las expectativas reales de la utilización práctica de estas estructuras en nuevos usos en el marco de un ambiente tecnológico, social y económico contemporáneo, son indicadores de que existe un mercado cautivo y en crecimiento.

En el campo de la aplicación, también existe la posibilidad de utilizar la transformabilidad, estudiada y rese-

ñada en este trabajo como un método constructivo que reviste importantes ventajas ya que es producido totalmente en taller, permitiendo un control total de las variables de calidad y precisión, independiente de las condiciones climáticas. Concretamente, adquieren vital importancia para el diseño y construcción: las conexiones móviles, el proceso de cerramiento y el mecanismo de transformación, ya que de ellos dependerá que la solución sea viable técnica y económicamente competitiva, respecto a otras estructuras no sólo transformables, sino también armables, que tienen mucho camino recorrido.

Lo que se intenta decir es que no deben verse los resultados de esta investigación únicamente restringida a la aplicación de un módulo, sino que, desde una óptica más amplia y a la vista de los resultados obtenidos, se abren nuevas áreas de investigación en el desarrollo de las estructuras preflexadas.

Con esta investigación eminentemente experimental que abarcó desde los aspectos conceptuales hasta su comprobación estructural y de aplicaciones, se comprobó una nueva tipología estructural que sustituye peso por fuerza, pudiéndose llamar "estructuras preflexadas". Queda demostrado que al igual que la hormiga, se puede cargar con más peso que el peso propio del esqueleto sustentante, lo que se traduce en eficiencia estructural.

## Referencias bibliográficas

Berger, Horst (1996). *Light structures structures of light : the art and engineering of tensile architecture*. Basel Birkhäuser, cop.

Gründig' Lothar (1974). "An example of the static-analytical computation for a suspended model", en IL-10. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, pag. 184-221.

Gründig' Lothar and D. Ströbel (2003) "Recent Developments in the analytical design of textile membranes" *Textiles Composites and Inflatable Structures*. UPC-CIMNE. University of Stuttgart.

Happold, Edmund (1976). "Calculation of the Shell", en IL-13 Multihalle Mannheim. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, pag. 60-98.

Mollaert, Marijke (2001). "From small parts to large structures". Baue mit Textilien Heft, pag. 1-9.

Otto, Frei (1990). Experiments. Form, force and mass. IL-23. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart.

Otto, Frei (1973). "Estructuras, Estudios y trabajos sobre construcción ligera". Gustavo Gili. Barcelona.

Otto, Frei (1967). Tensile structures : design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and Pneumatic structures. Cambridge, MA London : MIT Press, cop.

Otto, Frei y Tange, Kenzo (1974). Grid Shells. IL-10. Institute for Lightweight Structure University Stuttgart. Stuttgart.

Williams, Chris (2000). The definition of curved geometry for widespan structures, Widespan Roof Structures. Spo Press. University of Bath. UK.