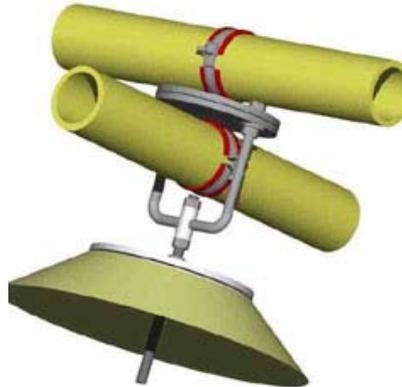


**ETSAB**

**ETSAV**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA - ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA -  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DEL VALLE - DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES  
ARQUITECTÓNICAS 1

**DISEÑO DE ESTRUCTURA TRANSFORMABLE POR DEFORMACIÓN DE UNA  
MALLA PLANA EN SU APLICACIÓN A UN REFUGIO DE RÁPIDO MONTAJE**

Tutor: Dr. José Ignacio Llorens  
Co-tutor: Dr. Ramón Sastre Sastre

Autor: Arq. Nelson Rodríguez

BCN Diciembre 2005

## Conclusiones

---

En esta investigación se avanzó en el conocimiento de las mallas pre-flectadas en el estudio de su geometría, proceso de obtención de la forma, comportamiento estructural y aspectos constructivos. En este sentido, se elaboró las siguientes conclusiones:

### **De la geometría y el proceso de obtención de la forma:**

Con respecto al estado del conocimiento de las estructuras ligeras, estructuras transformables y mallas deformadas podemos decir que una de sus principales características es la relación **forma = estructura** con lo que se hace imposible el diseño de estas estructuras ligeras con las herramientas tradicionales del ejercicio de la arquitectura y la ingeniería en el plano bidimensional. Esto obliga a implementar herramientas tridimensionales para su diseño, como vimos, el arquitecto Gaudí inventó el modelo invertido, posteriormente retomado por el ingeniero Frei Otto para el cálculo geométrico de las formas cupuliformes, y en este trabajo aportamos el método de las curvas de flexión.

El estudio de la trayectoria de las diferentes innovaciones que han permitido llegar al estado de conocimiento actual nos permitió detectar que la manipulación de la forma está en completa igualdad con la realización constructiva (materiales y detalles) y la geometría (aspectos cuantitativos de la forma). En este sentido, detectamos que el material usado para la construcción de mallas deformadas, tanto en las cubiertas de los pueblos nómadas referenciados, como los prototipos construidos ha sido la madera. En este sentido, este trabajo intentó realizar aportaciones con la selección de los plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV) como material principal de las barras dada las altas prestaciones de este material en cuanto a la relación poco peso / alta resistencia.

De los estudios que realizamos para analizar el método de generación de la forma a través del modelo colgante como herramienta de diseño, pudimos llegar a la conclusión que había problemas no resueltos entre la forma de la cubierta conseguida y la manera de ser construida y montada. El método suspendido, como dijimos en el capítulo N°1, está formado por curvas en catenaria sometidas únicamente a tracción bajo la acción de su peso propio, este método 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. El no contemplar dentro del cálculo geométrico de la forma estos esfuerzos iniciales explica el porqué en los prototipos y cubiertas construidas en la década de los 60'-70' muchos nudos rompieron durante el proceso de montaje.

Por otra parte, también podemos concluir que es viable incluir este tipo de estructuras dentro de la definición de las estructuras transformables, ya que como lo señalamos en el capítulo N° 1, estas estructuras requieren de mecanismos para realizar su proceso de erección, este mecanismo tendrá que ser bloqueado o de lo contrario la cubierta volverá a su posición inicial. Esta afirmación la pudimos comprobar numéricamente en el capítulo 2 y experimentalmente en el capítulo N° 3.

De los resultados de los estudios experimentales (modelos y prototipo) realizados en este trabajo, se pueden extraer una serie de conclusiones. Por una parte, este trabajo demostró la viabilidad de obtener cubiertas transformables a partir de la deformación de una malla de barras pasantes inicialmente plana, obtenida ésta por el método de las curvas de flexión. Las deformaciones asociadas al método de generación de la forma implican en las barras unos estados de tensión, que como se demostró numéricamente y experimentalmente, siempre

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

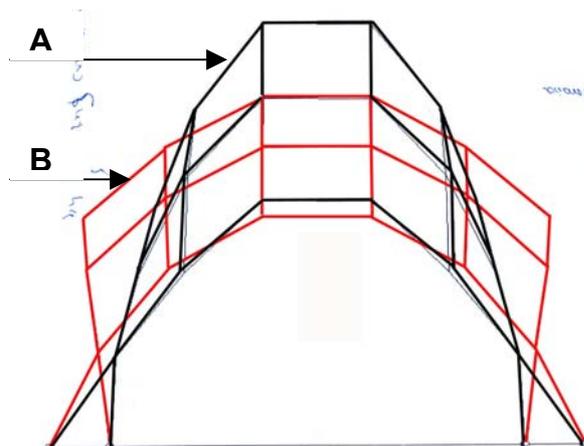
están por debajo del límite de rotura del material y en ningún caso se produce un curvado de las barras que no sea recuperable.

Sobre estos esfuerzos iniciales se puede concluir que son un grupo de tensiones que presenta la cubierta antes de entrar en carga por la acción de una fuerza externa que origina la deformación que, en el tipo de cúpula estudiada, se presentan normal al eje de la barra. En conclusión, las mallas pre-flectadas siempre estarán cargadas aunque no actúen sobre ellas ninguna fuerza, por tanto, para cada estado de tensión habrá una deformación.

Como resultado geométrico se obtuvieron:

Las coordenadas de todos las uniones  
Las longitudes de todas los elementos de barra  
Los ángulos de los rombos de la malla  
y áreas de cubierta

La comprobación constructiva del 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 sentido repartiéndolas uniformemente en todas las barras que la forman. De esta manera la malla se deforma homogéneamente generando la cúpula con cuatro arcos perimetrales de borde y puntos de apoyos.



Esta imagen de simulación computarizada compara el resultado obtenido de cargar una misma malla bajo la misma carga.

La malla marcada con el literal "A" y en línea negra, es una malla de hilos, la cual se deforma siguiendo la trayectoria de una catenaria. La malla marcada con el literal "B" y en línea roja, es una malla que tiene asignadas propiedades del material y su deformación es por curvas de flexión.

Esta comparación 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 pre-flectadas 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.

También permitió estudiar los materiales de las barras en que es posible la construcción de mallas deformadas (madera, plástico y acero) y determinar sus ventajas para ser aplicadas en el sistema. Sobre este aspecto hay que concluir que la longitud de la barra, el diámetro y su peso son los factores determinantes para la obtención de la forma de la cubierta obtenida por flexión, ya que 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. También hay que señalar que estas propiedades definen el transporte y la forma de montaje (grúa, andamios o cualquier otro mecanismo que pueda deformar la malla tridimensionalmente)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Del comportamiento estructural:

La deformación de la malla es principalmente debida a la flexión y a la distorsión diagonal de los cuadrados de la malla. El comportamiento a flexión de los miembros de la malla depende de tres factores: del valor del modulo de elasticidad, de las propiedades geométricas de la sección transversal de las barras, de la rigidez de las uniones de la estructura a las fuerzas de corte horizontal

Se producen cuatro tipos de esfuerzos:

La fuerza axial producida sobre las barras

La tensión axial producida en las diagonales de los rombos, que en esta estructura están ubicadas en las esquinas.

Las fuerzas de corte y los momentos de flexión producidas en las uniones de las barras, sobre todo en los ubicados en bordes.

La rigidez de la fuerza axial de las barras y de las diagonales depende solamente de sus secciones transversales y de los valores del modulo de elasticidad. Las barras transmiten fuerzas de compresión y las diagonales de tracción. Estas diagonales de tracción fue sustituida por una membrana textil pretensada y colgada de la estructura de barras que cumple cabalmente su función de arriostre y cerramiento, tal y como se demostró en el capítulo N°2.

El comportamiento de los miembros de la malla a las fuerzas de corte depende de cuatro factores:

De su rigidez a la flexión sobre el eje normal de las barras

Del espaciado entre las barras

De la rigidez de las uniones de la estructura.

De la sección de la barra

Desde el punto de vista de su lógica estructural la posibilidad de trabajar con una fuerza interna en los componentes estructurales que contribuya a la rigidez global de la estructura, la convierte en una estructura sumamente eficiente dado que disminuye considerablemente la cantidad de material para resistir su peso propio. En conclusión, se estaría inaugurando una nueva tipología estructural la que podríamos denominar **ESTRUCTURAS PRE-FLEXTADAS**, que sustituye peso por fuerza, en este caso, por fuerza de flexión. Con lo que se logra disminuir las energías, representada ésta en la disminución considerable del peso

## De los aspectos constructivos:

Los nudos es para estas estructuras uno de los aspectos más delicado, como ya hemos señalado. Los nudos evolucionan con el conjunto de la malla y requieren de bloqueo de la articulación una vez alcanzada la forma final. Este bloqueo tiene que ser reversible, es decir, que los nudos puedan ser desbloqueados, para asegurar la recuperabilidad de la estructura y cumplir las condiciones de estructura portátil y transformable para que pueda moverse, cambiar de lugar y erigirse nuevamente

El desarrollo del nudo dependerá del material de la barra, si el material es frágil lo más recomendable es abrazar la barra y si es un material elástico-plástico, como el acero, la barra podrá ser atravesada con pasadores, estudiando que sus dimensiones sean tales que no debilite la sección de la barra.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los nudos deben asegurar que entre las barras no se produzcan ningún contacto entre ellas hasta haber concluido todo el proceso de erección de la estructura, permitiendo, a su vez, la transformación de la malla de la posición plana a la posición deformada gracias al giro que debe realizarse en los nudos. Este giro, debe ser sin que las barras se suelten ni que se produzcan desplazamientos entre ellas. De caso contrario, se perderá la flexión inicial y con ella la geometría encontrada, aspecto último que sucedió en varios de los modelos realizados en la etapa experimental.

Como se ha explicado la configuración de la malla es por barras pasantes, lo cual implica unas excentricidades en la actuación de las fuerzas que solicitan a los nudos por corte, tal y como se demostró en el capítulo N° 2. Este efecto deberá reducirse a rangos aceptables, que en el caso de estudio de este trabajo es aumentando el espesor de las abrazaderas, teniendo en cuenta su protección con gomas aislantes para evitar cortes en la sección de la barra producto de la presión que ejercerá la abrazadera sobre la barra.

Para lograr el cambio de forma se necesita que los cuadrados de la malla plana se transformen en rombos para ser cúpula. Una vez deformada, los ángulos más abiertos se ubican cerca de los ejes de simetría de la cúpula estando entre 80 a 90 grados. Los ángulos más cerrados se encuentran en las esquinas a lo largo de las diagonales del cuadrado. El conocimiento de los ángulos de la malla y su distribución tiene particular importancia para desarrollo de los detalles constructivos de la malla, así como también, de su configuración geométrica.

Con respecto a los anclajes, en este estudio lo realizamos cruzando las barras del perímetro para que cuando suceda la deformación resulten, por defecto, dos barras donde realizar el anclaje al piso, obteniendo de esta manera una mayor estabilidad cuando la malla es estructura. Sobre estos aspectos queda mucho por investigar como por ejemplo si el anclaje es más adecuado considerarlo articulado durante el montaje y también durante el uso como estructura o articulado durante el montaje y empotrado durante el uso.

### **Del proceso de erección:**

Otro de los aspectos que nos permitió estudiar este trabajo de investigación fue el proceso de montaje y determinar las diferentes secuencias y fases críticas hasta completar la deformación. Sobre este punto se puede concluir que la deformación tiene tres momentos importantes, el primero, es el inicio de la deformación por el peso propio de la malla al actuar sobre ella las fuerzas gravitatorias.

La segunda, es la más delicada porque requiere de aplicar fuerza externa para vencer la inercia del material, aunada al comportamiento de la malla como red que se opone a la deformación. En esta fase, la fuerza axial se incrementa notablemente, lo cual constituye una etapa es muy delicada porque se pueden presentar roturas en las barras justo en los puntos de unión, debido a fuerzas mal aplicadas que produzcan desequilibrios.

La tercera, es el esfuerzo final que hay que aplicar a la malla, ya deformada, para llevarla a su punto final de anclaje. En todas estas etapas hay que ir evitando roturas de los miembros de la malla por lo que, las fuerzas externas deben ser aplicadas a través de mecanismos que la distribuyan homogéneamente sobre la superficie de manera tridimensional (en los ejes X;Y;Z)

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **Del Prototipo y su producción:**

De la construcción del prototipo experimental y de los modelos podemos destacar, además de las conclusiones cualitativas, antes mencionadas, la definición de ser una estructura transformable cuya capacidad de reutilización es de 100%, permitieron determinar los desajustes geométricos de la estructura para acotarlos de forma que tengan cabida las tolerancias dimensionales inherentes al proceso de erección.

La escogencia de barras de 6 mts de longitud facilita el armado y junto con el espaciado de la malla entre barras, de 100 centímetros, contribuyen a disminuir el peso global facilitando tanto el transporte como el montaje.

La estructura desarrollada es una construcción seca y modular constituida con barras de igual tamaño en longitud y sección, esta propiedad unida a que el nudo propuesto es por presión, permite el completo desarmado de la malla. Las barras pueden, entonces volver a su estado original plano, pudiendo ser reutilizadas sin perder sus condiciones y propiedades estructurales, lo cual hace que pueda ser utilizada para otros usos dentro del campo de la construcción y alargar el ciclo de vida del material

Como en las barras no se cortan para ajustar sus dimensiones, ni se hacen agujeros, el criterio de “Cero Desperdicio” es palpable, aunado por el criterio de ensamblaje de componentes y la no-producción de desechos durante la construcción, ya que no se requiere de soldaduras, ni el uso de grandes cantidades de pegamentos. El armado de la estructura de barras es atornillado o apernado.

Desde el punto de vista de su producción, la estructura utiliza productos provenientes de la gran industria (acero o la del plástico) para los componentes de las barras, pletinas y tortillería. Para la producción de los nudos que incluye actividades de corte, doblado, pintado o galvanizado se pueden realizar en pequeños talleres locales, tal y como sucedió en la construcción del prototipo. Igualmente el ensamblaje final de la estructura no necesita de maquinarias pesadas por lo que se pueden realizar en pequeños talleres o almacenes para ser transportada al sitio de su erección. Esto nos indica que para su puesta a punto como sistema e introducción al mercado no necesita de grandes inversiones en costosas plantas sino que aprovecha para su producción, la capacidad instalada existente. Esta estrategia aportará ventajas desde el punto de vista de las economías locales donde se produzca la estructura, aunque es importante que la producción sea seriada para amortizar los costos.

En este sentido podemos afirmar que es una tecnología apropiable debido a que es básicamente tecnología blanda, es decir, lo integran los recursos humanos, organizativos y de conocimiento. Que puede integrarse a las culturas constructivas de los pueblos.

### **De las aplicaciones:**

Desde el punto de vista de la aplicación, podemos concluir que existen dos enfoques que definen caminos distintos de uso. La primera, es si consideramos el prototipo como una cubierta modular, tal u como se presentó al final del capítulo N° 3. Está podrá ser usada en aquellos casos que requieran construcciones en lugares de con costos elevados de mano de obra o escasez de la misma o donde la velocidad y rapidez de construcción es prioritaria sobre las otras variables incluyendo la económica.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La segundo enfoque es si se considera los resultados obtenidos en este trabajo como método constructivo implementada en el campo de las estructuras de rápido montaje, pudiéndose realizar con materiales de cada localidad que cumplan con la condición de tener capacidad para ser flectados. En este sentido, puede aplicarse a la producción de edificaciones, teniendo como perspectiva desarrollar un sistema que pueda, por ejemplo, iniciar la construcción por el techo, ya que se ha demostrado que en las zonas populares de Latinoamérica primero se habita y luego se construye, orientándolo hacia las estrategias que apuntan a la progresividad constructiva de las edificaciones.

Con respecto a la relación aplicación como módulo estructural/costo, hay que tener cuidado en hacer comparaciones que puedan otorgar resultados desvirtuados o equivocados o trasladar el costo del prototipo de estudio y afirmar que son los costos de producción. Hay que tomar en cuenta que el sistema de cubierta que se propone, en este trabajo, no es tradicional y esto supone de unas amenazas a las que hay que enfrentar con las herramientas adecuadas. Por una parte, ya es ampliamente conocido que un sistema es más costoso al ser introducido en el mercado debido a la poca difusión y producción masiva que contribuya a disminuir los costos. Otra amenaza latente que este sistema deberá enfrentar, es la falta de práctica y costumbre en el usuario, lo que puede generar un posible rechazo cultural inicial, la cual habría que enfrentar con entrenamiento. Por otra parte, la falta de conocimientos técnicos sobre el sistema en el grupo de profesionales encargados de la producción, armado y montaje podría presentar problemas en etapas sensibles como lo son el ensamblado y montaje. Todos estos factores de riesgos tendrán irremediablemente una influencia en los costos del sistema en las primeras etapas de su introducción.

### **De la metodología:**

El método usado fue una secuencia de partes interrelacionadas entre sí, estableciéndose una interdependencia de ida y vuelta entre las partes. Por ello, en reiteradas ocasiones un avance en algunos de los tópicos significaba un retroceso en otros. Así como también, muchos de los resultados obtenidos se complementaron e hicieron posible la toma de decisiones.

La metodología empleada para la realización de la investigación a la vista de los resultados obtenidos fue adecuada. Se partió de lo general, con la definición de las características de las estructuras transformables y los fundamentos técnicos de las mallas deformadas, hasta llegar a lo particular, con el desarrollo de las comprobaciones numéricas, la construcción de modelos y prototipos y el desarrollo de detalles, piezas y uniones.

Éstos modelos se construyeron con variables controladas como la longitud de la barra (patrón) y la forma final obtenida. Los ensayos experimentales, como el cálculo numérico con programas de cálculo No-lineal, los ensayos de materiales y el ensayo del túnel de viento para hallar las presiones que sobre la superficie actúan, fueron importantes en la demostración de las hipótesis, pudiendo determinar como se deforma la estructura y sus reacciones.

Hay que mencionar que como todo trabajo científico el resultado aquí obtenido no es, ni mucho menos, definitivo porque pueden contener errores, es por todos sabido que el trabajo científico de investigación se basa en la verificación constante de los resultados. Sin embargo, a la vista de los resultados de la etapa de experimentación, nos permitió demostrar, la viabilidad constructiva de estas estructuras. En este sentido, se debe insistir que las mallas pre-flectadas se pueden definir como estructuras transformables, dado que

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

la malla retorna a su estado inicial plano, no llegando al límite elástico ni a al límite de rotura del material.

### **Recomendaciones finales:**

Las recomendaciones están orientadas a establecer una estrategia para la continuación de esta investigación. Hay que considerar que esta investigación ha estado enmarcada, por un parte, dentro de la línea de investigación de las Tenso-estructuras del IDEC-FAU-UCV y por la otra, ha sido parte integral del plan de formación de para profesores instructores del autor. Estos estudios se iniciaron dentro de la escolaridad de la maestría en desarrollo tecnológico del IDEC y se continuó su profundización y desarrollo dentro del programa doctoral del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela de Arquitectura de Barcelona-ETSAB.

Como ya se ha mencionado, esta investigación demostró que es posible y viable utilizar las mallas pre-flectadas como una estructura transformable desde una óptica geométrico-constructiva. Para su demostración se hizo prioritario que esta investigación abordara los aspectos cuantificables del comportamiento estructural tanto de la generación de la forma hasta cuando la malla es una estructura en servicio. En este sentido proponemos las siguientes líneas de acción:

- En cuanto a su comportamiento estructural esta investigación puede continuar haciendo estudios detallados de cada una de las piezas que la conforman para determinar los puntos vulnerables en los detalles, sobre todo de los nudos y anclajes para optimizar su funcionamiento. En este estudio pueden realizarse vinculando los archivos de los dibujos elaborados en los programas de diseño asistido por computadora (CAD) y los de cálculo numérico por elementos finitos, a través de la exportación de la geometría tridimensional y preservando la funcionalidad de los dibujos originales, esto puede abrir una interesante línea de investigación de detalles constructivo de la arquitectura ligera
- Realizar pruebas de cargas al prototipo en prolongados periodos de tiempo y determinar discrepancias entre el cálculo bajo cargas verticales y la prueba de carga experimental, determinando si la estructura se comporta elásticamente al ser capaz de recuperar la forma original.
- Evaluar su durabilidad y envejecimiento para determinar los estados límites de uso de la estructura, sin que los materiales pierdan sus propiedades estructurales producto del contacto prolongado con los agentes ambientales, sobre todo por la acción de los rayos UV.
- Experimentar con otros mecanismos para el sistema de erección que cumplan con la condición de actuar tridimensionalmente y repartir la carga homogéneamente sobre toda la estructura.
- Desarrollar una metodología para el estudio otros tipos de cúpulas simétricas o asimétricas, con diferentes patronaje en las barras, es decir, desarrollar una estrategia para determinar las diferentes longitudes de las barras para obtener la forma por el método de curva de flexión.

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- Estudio de los aspectos físico-ambientales (confort térmico, efecto invernadero, ventilación e iluminación natural, entre otros) con cerramientos ligeros textiles, tal y como se presenta en este trabajo, o con materiales opacos rígidos de mayor inercia térmica. Esto puede realizarse tanto al prototipo con mediciones experimentales como por simulaciones computarizadas y determinar discrepancias de tal manera de otorgar las garantías ambientales correspondiente
- Elaborar estudios de sostenibilidad como el ciclo de vida de los materiales, producción de residuos aguas arriba, la durabilidad global de la estructura como estructura transformable, consumo de energía, utilización de materiales tóxicos y contaminantes y las estrategias para mitigar su impacto
- Estudios de factibilidad de mercado que incluya una estructura de costo enfocada hacia la producción seriada y masiva, determinando si es viable su incorporación a la industria de la construcción como un producto elaborado de componentes compatibles o como un método constructivo abierto.

La reina Mab, partera de hadas, aparece en una carroza hecha de cáscara de avellanas, los radios de las ruedas de su carreta están fabricadas de largas patas de araña, la cubierta, de alas de saltamontes, las riendas de finísima telaraña, las colleras, de húmedos rayos de luna, su látigo, de un hueso de grillo, la tralla de hebra sutil y tirada por un tronco de minúsculos átomos

Mercucio en Romeo y Julieta W. Shahepeare

**Arq. Nelson Rodríguez**  
ETSAB-UPC. Barcelona 2006

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES