

## Bóvedas transformables: mejoras y desarrollos

Carlos Henrique Hernández

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Central de Venezuela

Raúl Cebrian

Valencia, Venezuela

### Resumen

En este trabajo se presenta el proceso de evolución de diseño y fabricación de las bóvedas transformables. En 1987, se diseñó y construyó el primer prototipo venezolano de bóveda transformable a escala real con el objeto de determinar y resolver problemas constructivos, de manejo y de estabilidad, tanto estructural como a factores ambientales, resistencia al desgaste por uso y la aceptación por potenciales usuarios. Para 2005 se presentó la oportunidad de completar e incorporar las modificaciones que se habían propuesto pasando a desarrollar la fase productiva. Se modificó la estructura cambiando los perfiles de aluminio por perfiles de acero, con la finalidad de reducir los costos y hacer la estructura más comercial. Se diseñó el detalle para resolver las perforaciones en los perfiles para el paso de los ejes y se desarrolló el procedimiento y equipo para cortar la perforación y añadir refuerzo.

Además se desarrolló una nueva cubierta para la malla estructural que por su nueva geometría, con doble curvatura, se hizo más estable y capaz de soportar cargas de viento.

### Descriptor:

Estructuras transformables;  
Estructuras plegables;  
Cubiertas transportables.

### Abstract

*In this paper we summarize the evolution process on the design, and fabrication of the deployable vault structures. In 1987 a first real size Venezuelan prototype was designed and built with the purpose of determining and solving problems regarding its construction, handling, stability in terms of both structural as well as environmental factors, resistance to wear due to use, and acceptance by potential. In 2005 there was an opportunity to complete and incorporate modifications that had been proposed. At this moment we start the development of processes for industrial production. The structure was modified changing the aluminum profiling to steel tubular profiles with the purpose of lowering costs, aiming to make the structure more commercial. A detail to solve the perforations in the profiles for the passing of the axes was designed, and the procedure and equipment to cut the perforation and add reinforcement was developed.*

*A new membrane was also developed for the structural mesh, with its new anticlastic geometry, it was more rigid a able to stand wind loads.*

### Descriptors:

Deployable  
Structures, Foldable, Vaults,  
Transportable Shelters.

ESTRAN se denominan las estructuras transformables, basadas en el sistema de tijera, y así como un grupo de diseño que desde 1987 viene trabajando en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDECA, de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela, con la colaboración del Dr. Waclaw Zalewski, profesor Emérito del Instituto Tecnológico de Massachusetts- MIT, en Boston, Estados Unidos.

Las estructuras transformables de bóveda, que utilizan el mecanismo de tijera para su plegado, han tenido un largo desarrollo en el IDECA, en donde los primeros modelos a escala se empezaron a construir en 1987. La evolución del proceso, su fabricación y puesta en uso de los últimos desarrollos de bóvedas transformables se muestra en el presente trabajo a manera de balance de una experiencia de más de 20 años con este tipo de estructuras destacando los problemas de producción industrial, la resolución de detalles, la búsqueda de soluciones adaptadas a las condiciones del entorno económico y social, así como los esfuerzos de introducción en el mercado de este nuevo concepto arquitectónico.

Estas líneas son un recuento de toda una experiencia que ha permitido a los grupos de trabajo que han participado en la experiencia ESTRAN convertirse en una referencia importante en este tipo de estructura tanto en el país como en el ámbito internacional.

### Primeras estructuras

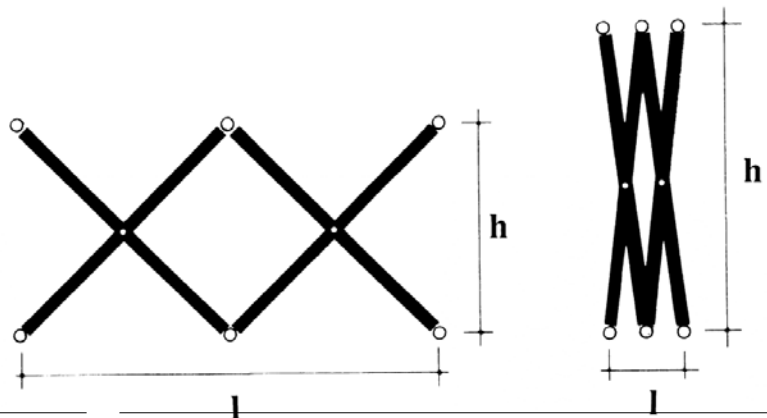
Las primeras estructuras ESTRAN se diseñaron y construyeron con el objetivo de ensayar los conceptos desarrollados durante el estudio de estructuras transformables tipo tijera (Escrig, 1984; Monjo 1990) (figura 1), utilizando modelos a escalas reducidas que habían sido desarrollados en el MIT por W. Zalewski (Hernández, 1987) (figura 2). Como forma estructural fue seleccionada la bóveda cilíndrica de marcos no triangulados, ya que esta geometría era una de las formas más sencillas de construir. Un mayor número de elementos de dimensiones iguales, nodos más simples y una geometría totalmente compatible le otorgaban ventajas sobre otras configuraciones y formas estructurales (Escrig y Varcácel, 1987; Hernández, 1997 y Monjo, 1990). La geometría escogida tenía la característica de que no se triangulaba a través de sus elementos rígidos sino por diagonales de cables. Estos cables actuaban sólo en el momento en que la estructura se encontraba completamente desplegada, por lo cual ella era inestable durante

las etapas intermedias del proceso de plegado y desplegado. Sin embargo, esta condición se contrarrestaba con el logro de un menor peso y de conexiones más simples.

Las dimensiones eran determinadas por las reglas geométricas que debían seguir estas estructuras para que pudieran plegarse (Monjo, 1990 y Sánchez-Cuenca, 1996). Para la bóveda cilíndrica las dimensiones de la malla se calculaban usando la fórmula de la figura 3, donde el radio ( $R$ ) se definió de acuerdo a la luz a cubrir. También se definió el número de divisiones o ángulos  $\theta$  que iban a determinar la longitud de los perfiles. En la primera estructura que se hizo,  $R$  se tomó 7 m., ya que en el momento en que se estaba diseñando había interés por parte de la Fuerza Aérea Venezolana de utilizarla en hangares portátiles para sus aviones, para los cuales la dimensión de 14 m. de luz se adaptaba adecuadamente.

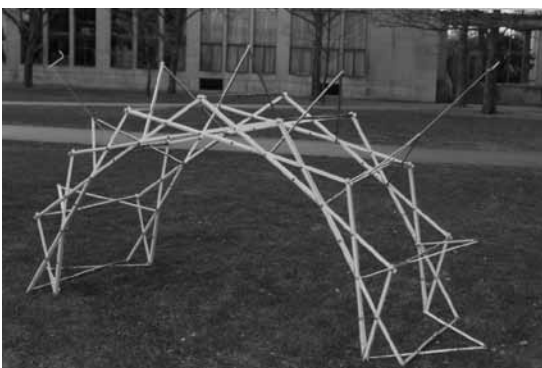
El diseño de la estructura se basó en criterios de economía y de sencillez constructiva, utilizando elementos existentes en el mercado local o de muy fácil fabricación. Se tomó en cuenta que la fabricación sería realizada directa-

Figura 1  
Sistema de aspas o tijera



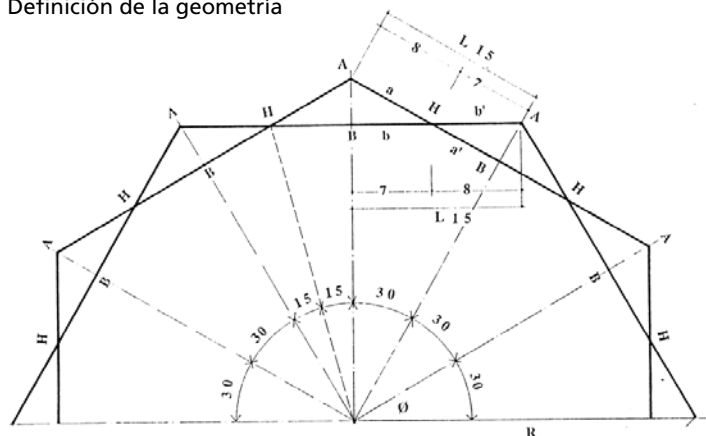
Fuente: elaboración propia

Figura 2  
Modelo de arco transformable



Fuente: elaboración propia

Figura 3  
Definición de la geometría

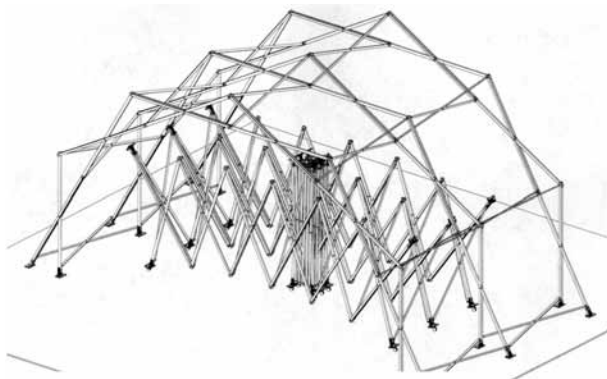


Fuente: elaboración propia

mente por el equipo del IDEC, sujeta a los recursos disponibles en la planta experimental del Instituto y en conocimiento de que la importancia del modelo a construir radicaba en su comportamiento geométrico y de manipulación más que en los detalles constructivos o métodos de producción.

El resultado fue una retícula espacial transformable de superficie generatriz cilíndrica, que desplegada tenía 8m de profundidad por 14m de luz, generada por una bóveda de 7m de radio. Tenía un área cubierta de 112m<sup>2</sup> y plegada conformaba un paquete compacto de 4,2m x 1m x 1m, con un peso de 500Kg. Esta estructura estaba formada por tres arcos paralelos, un arco central y dos exteriores unidos por catorce brazos iguales perpendiculares a los arcos y colocados sobre planos radiales generados por el eje de rotación del cilindro y los nodos en los arcos. Cada arco estaba constituido por seis ensamblajes tipo tijera, cada uno formado por perfiles de aluminio de sección rectangular, un elemento central de mayor sección (45mm x 100mm) y dos elementos exteriores, uno a cada lado del anterior de menor sección (32mm x 75mm). Los brazos estaban formados por dos elementos lineales de sección 32mm x 75mm (figura 4).

Figura 4  
Malla estructural



Fuente: elaboración propia

## Despliegue

El proceso de despliegue de la primera estructura transformable del ESTRAN como bóveda, se convirtió en el elemento clave para su correcto comportamiento. La manipulación de la estructura (su almacenaje, transporte, montaje y desmontaje) aportó mucha información sobre el comportamiento de los diferentes componentes. Sobre la base de esta información se produjeron las diferentes nuevas versiones del ESTRAN.

La primera versión de ESTRAN (figura 5) fue concebida para ser montada sin ayuda de grúa, por lo que aparecen en los primeros dibujos los patines sobre los cuales se coloca el paquete de la estructura plegada (figura 6A-6H). La disponibilidad de una grúa incorporada a un camión de transporte permitió que se trabajase inicialmente mediante manipulación mecánica. Para ello se colocó un gancho en el nodo superior central de la estructura que permitió el colgado del paquete estructural.

La conformación geométrica de la estructura indujo a que el movimiento de despliegue, en su fase inicial, fuera un proceso de crecimiento o expansión en el plano horizontal de los dos ejes coordenados, partiendo del eje central del paquete que actuaba como foco de expansión. Esto hizo que el paquete creciera de su medida inicial compactada de 0,80m x 0,80m en el plano horizontal, a 20m x 8m. Estos veinte metros correspondían al desarrollo del arco que se formaría al continuar el proceso de despliegue que era, a partir de ese momento, un movimiento de elevación de la zona central de la estructura para llegar a su altura máxima de 7m y un movimiento horizontal hacia el centro de los extremos de la estructura tendiendo a cerrar el arco (figura 5). Durante el proceso de despliegue la estructura era inestable en el plano horizontal

Figura 5  
Proceso de despliegue



Fuente: elaboración propia

debido a la escogencia de los cables tensores como recursos de triangulación que no trabajaban hasta que se lograba el despliegue total. La estructura tendía, por lo tanto, a desplazarse en este plano produciendo movimientos que debían ser controlados ya que podían dañarla durante el despliegue. Esta maniobra se realizaba con un operario que mantenía en posición la zona central del arco. El efecto de desplazamiento del centro de la estructura iba a ser más pronunciado durante el proceso de despliegue sin grúa, ya que durante ese lapso la zona central del paquete tenía más libertad de movimiento.

El método con grúa es rápido y requería poco trabajo físico (figura 6A), pero los costos de alquiler de la grúa y la dificultad de su acceso a algunos lugares llevó al equipo de ESTRAN a desarrollar procesos de montaje y desmontaje no dependientes de este tipo de ayuda mecánica. En primer lugar se añadieron ruedas a la estructura para reducir el roce con la superficie de despliegue (figura 6H/I). Las ruedas permitieron, además, desplazar el paquete desde el vehículo de transporte hasta el lugar donde se efectuaría el despliegue. El diseño del patín original se simplificó a una sola rueda con giro en el plano horizontal y que, con el diámetro adecuado, se mantenía apoyada durante todo el despliegue (figura 6I).

La primera etapa del despliegue manual era similar al caso con grúa. La estructura se expandía horizontalmente al halar diagonalmente los cuatro extremos hasta el punto donde comenzaba a elevarse (figura 6E), en este momento se colocaban dos polipastos de 500 Kg. de capacidad en las tijeras centrales de los dos arcos exteriores a donde se tenía fácil acceso (figura 6B). El polipasto, con la cadena totalmente liberada, se conectaba al nodo superior y al nodo inferior sobre platinas colocadas para este fin. La cadena se comenzaba a recoger, produciéndose una fuerza que tendía a reducir la distancia entre los nodos, cerrando las tijeras y haciendo que la estructura se levantara (figura 6F).

Para reducir la tensión sobre los perfiles centrales se podía ayudar al despliegue empujando los cuatro perfiles de apoyo de las esquinas hacia el centro, con lo cual el despliegue se continuaba hasta que los topes de la estructura llegasen a su posición. Los polipastos podían dejarse colocados en la estructura y utilizarse para el repliegue de la estructura que se realizaba siguiendo los mismos pasos en forma inversa.

Se ensayó otro método de repliegue de la estructura con buenos resultados que consistía en conectar los extremos inferiores de dos de los arcos entre sí (figura 6G) con dos cuerdas y poleas, soltando las cuerdas lenta y paulatinamente de tal manera que el propio peso de la estructura liberada de los elementos de bloqueo la hiciera bajar hasta que el arco desaparecía, procediendo a plegar el paquete empujando diagonalmente hacia el centro los extremos de la estructura (figura 6C).

Al realizarse el cambio en el material de los perfiles de aluminio por acero, en una versión posterior, hubo un aumento importante en el peso de la estructura, la que pasó de 500 Kg. a 1.500Kg. Esto llevó, de nuevo, a la necesidad del uso de una grúa para la manipulación y el despliegue. La escogencia de la grúa estaba determinada principalmente por el largo requerido de la pluma más que por el peso de la estructura. La grúa debía colocarse de frente a la estructura, a una distancia tal que no obstaculizase el despliegue (min. 6 m) y que con la pluma desplegada pudiera llegar al centro de la estructura, sin tocar los arcos exteriores, cuando la malla está totalmente desplegada. Lo que obligó a utilizar una grúa de 40 ton. El proceso de despliegue era igual que en el caso de la estructura de aluminio, sólo que se requirió de un mayor número de personas para su manipulación (figura 6D).

## Cubierta

Otro punto que recibió especial atención fue el de las cubiertas. Todas las cubiertas fueron elaboradas con una membrana de poliéster recubiertas de PVC con un peso de 700 gr/m<sup>2</sup>. Se escogió este material por su poco peso, bajo costo y resistencia al plegado. La duración entre las membranas estructurales es media (10-15 años) (Hernández, 1987), lo cual no era problema en el caso de una estructura itinerante como el ESTRAN porque su sustitución resultaba muy sencilla.

Las primeras tres membranas construidas fueron planas y sólo en la versión desarrollada para un pabellón itinerante se introdujo una membrana anticlástica, que permitió darle mayor capacidad de resistencia al viento y redujo el número de conexiones a la estructura.

La primera cubierta se colocaba en la cara exterior de la malla estructural utilizando la pieza de la (figura 7E) que presiona la membrana entre dos discos (figura 7D).

Este sistema, que tenía la ventaja de permitir que la membrana acompañara la malla estructural en todo momento, no funcionó. El material de la cubierta tendía a quedar atrapado entre los perfiles y a ser rasgado por estos, deteriorándose la membrana en muy pocos ciclos de apertura. Este problema se pudo solventar utilizando perfiles de sección circular en vez de rectangular o la eliminación de las aristas de los tubos rectangulares. Pero por sencillez constructiva y disponibilidad no se cambiaron los perfiles, por lo que las siguientes cubiertas se colocaron por la parte inferior. La membrana se suspendía de la estructura a través de 33 tornillos con anillos, los cuales se sujetaban a la membrana por presión entre dos discos que a la vez sellaban la junta (figura 7E). Así, la membrana estaba reforzada en los puntos de sujeción y los anillos metálicos separados de esta por anillos de poliestireno para protegerla de posibles y futuros desgarres.

Se probaron diferentes métodos de colocación de la membrana. Unos durante el proceso de despliegue y otros al finalizar éste. En el primer método ensayado se desplegaba la estructura hasta el punto donde comenzaba a levantarse del suelo; era en este momento cuando se extendía la cubierta bajo ella y se colgaba directamente sobre la estructura en los soportes que esta tenía para ello

(figura 7A). Se continuaba con el proceso de despliegue, en el cual la estructura se levantaba llevando con ella la cubierta (figura 7J). A pesar de que este método era bastante fácil y rápido la cubierta interfería en las operaciones de bloqueo de la estructura y para los propios ajustes de tensado de las cubiertas. Por tanto, los operarios no podían realizar estas operaciones desde abajo utilizando un andamio móvil y tenían que recurrir a escalar la estructura y a trabajar desde arriba lo que resultó difícil y muy lento.

Por otro lado, desplegar la estructura con la cubierta implicaba 100 Kg. más de peso lo que en el proceso con grúa no es muy apreciable pero sí cuando la operación se realizaba manualmente. Como proceso alternativo se ensayó levantar la cubierta una vez que la estructura había sido totalmente desplegada y estabilizada, utilizando para este fin un sistema de poleas (figura 7F), colgadas de la estructura antes del despliegue total y que luego permitían elevar la cubierta desde abajo (figura 7B). Se elevaba en dos partes, primero utilizando como apoyo el arco central y uno lateral, lo que permitía el acceso a la zona central de la cubierta para su ajuste. Una vez realizada esta operación se levantaba el tercer arco y se completaba el ajuste desde el exterior de la estructura (figura 7K). Con este método

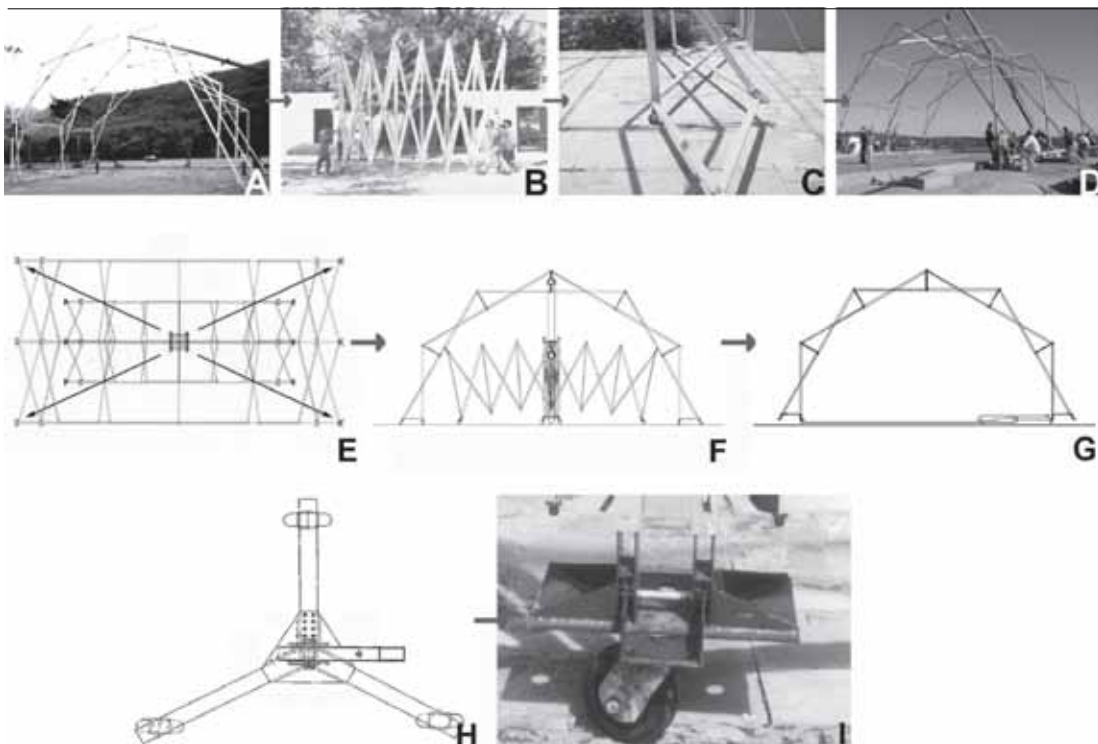


Figura 6  
Evolución  
de los procesos  
de despliegue

Fuente: elaboración propia

do la estructura podía quedar colgada a los cabos que se utilizaban para su elevación.

Posteriormente se trabajaba en proveer a la malla estructural de una membrana anticlástica que permitía mayor estabilidad de la estructura. Se estudiaron varias posibilidades, usando modelos físicos y el programa de generación de mallas EASY. Se seleccionó para aplicar en el pabellón itinerante (figura 7L) una membrana que se sujetaba sólo en los arcos exteriores de cada módulo y se tensaba desde la base de los arcos (figura 7C). En el caso del pabellón itinerante, como sistema de conexión a la malla transformable se utilizaron correas que se apoyaban en un eje colgado desde los nodos del arco (figura 7G). Este sistema era limpio, fácil de manipular y debido a que no utilizaba componentes metálicos no se dañaba la membrana durante su plegado y transporte. Este sistema tuvo problemas en la conexión de la correa con la membrana lo que requirió, al final, la colocación de refuerzos metálicos.

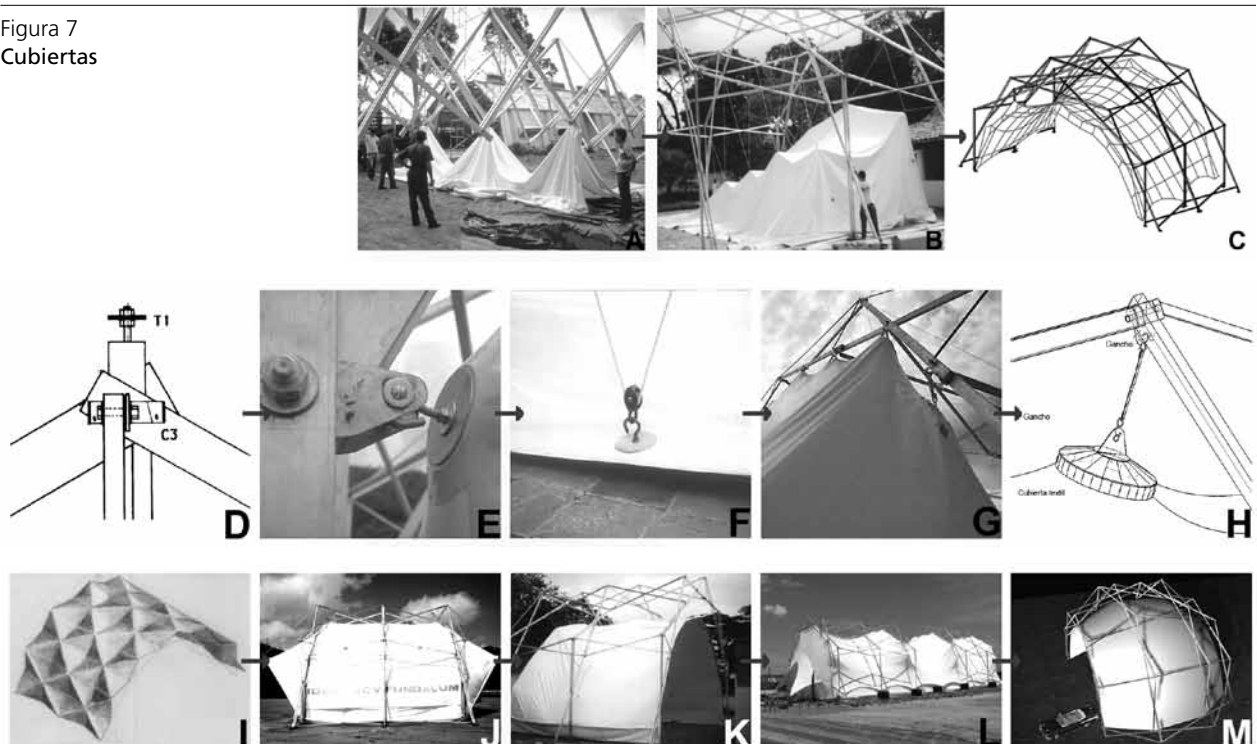
### Detalles

Para visualizar con mayor claridad la evolución de los detalles, estos se dividieron en cuatro categorías: nodos, extremo de los perfiles, base y tops.

Los conectores o nodos del ESTRAN han sido piezas que han variado poco. Los cambios importantes se han realizado en su vinculación con los perfiles (figura 8A,B y C).

Los primeros conectores o nodos se construyeron en acero galvanizado, y en la versión 2 se hicieron en acero inoxidable. Fueron desarrollados sólo dos tipos de conectores en las diferentes versiones de la estructura de bóveda transformable: El conector de los arcos exteriores, formado por un eje axial de  $\varnothing 19$  mm, terminado en un extremo con una aleta que recibía uno de los extremos de los brazos que unía los arcos y, en el otro extremo, la barra rosca que recibía dos tuercas (una que fijaba el conector en posición y la otra que fijaba los elementos de refuerzo y de bloqueo en la cara lateral de la estructura). El conector central se diferenciaba del exterior en que sus extremos terminaban en aletas que permitían la conexión con los brazos perpendiculares (figura 8A). Una de estas aletas era removible, para permitir el ensamblaje y se fijaba con dos tornillos de  $\varnothing 1/4$ " , que la atravesaban perpendicular-

Figura 7  
Cubiertas



Fuente: elaboración propia

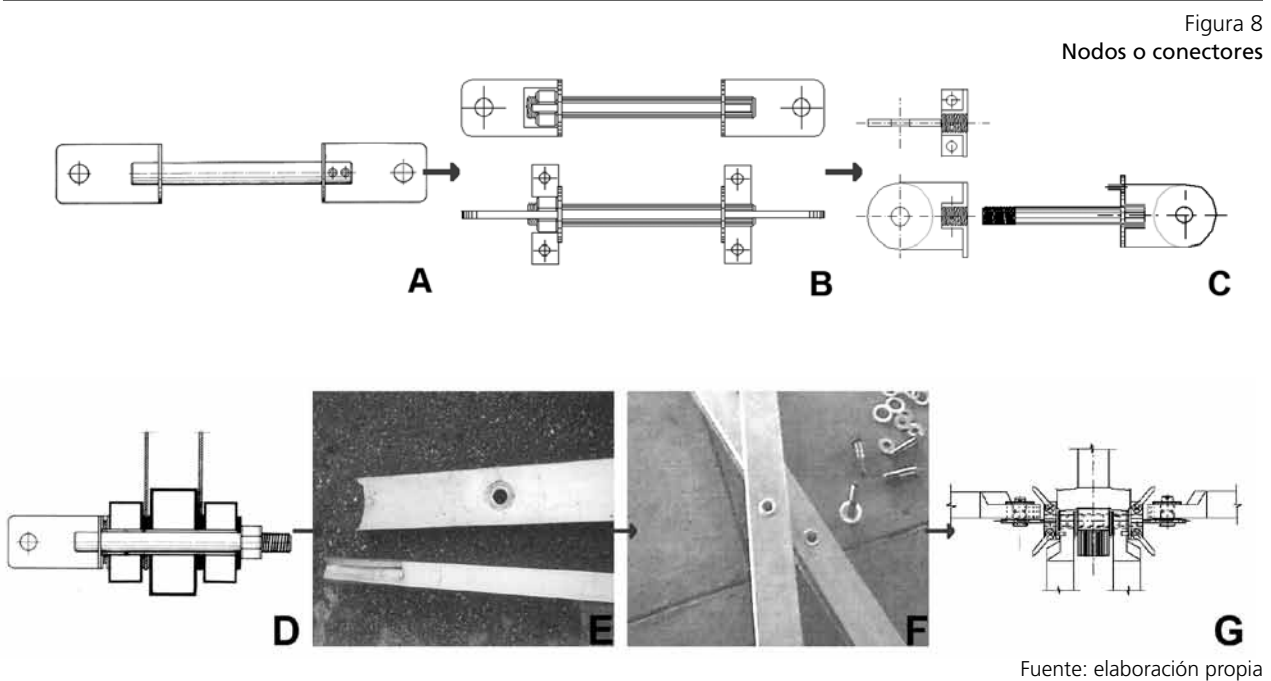
mente. Esta conexión fue sustituida posteriormente con una roscada (figura 8B) más resistente, agregando también al conector los puntos de fijación de los cables. Y en la versión 1.1 (figura 8C) se agregaron topes para limitar el movimiento de los conectores y reducir los esfuerzos de torsión que eran soportados por los perfiles de los brazos en las versiones anteriores. Estos topes generaban una ligera diferencia entre los nodos del exterior de la estructura a los interiores, por lo que en esta versión aparece un tercer tipo de conector.

Los perfiles de aluminio se aislaban de los conectores de acero mediante cojinetes que reducían el roce entre los componentes móviles y a la vez evitaban la corrosión galvánica que se produce entre el aluminio y el acero. En la primera versión del ESTRAN se utilizaron cilindros de poliuretano rígido para cubrir el eje axial del conector y arandelas de poliéster entre los perfiles (figura 8D). Sin embargo, al cabo de un tiempo (50 aperturas), el borde del perfil comenzaba a cortar el poliuretano, se producía excesiva tolerancia en las uniones, se ocasionaba daños a los perfiles y se afectaba el funcionamiento de la estructura (figura 8E).

Para las siguientes versiones se fabricó un cojinete de nylon, por ser éste un material rígido, de mayor dureza que el poliuretano, menos propenso a ser cortado y muy liso, lo que reducía la fricción entre las partes móviles. Se

diseñó el cojinete de forma tal que sustituyera también las arandelas plásticas. Con este cojinete se eliminaron los problemas anteriores, pero los perfiles continuaron aplastándose y fracturándose, por lo que se buscó una solución. Se insertó un segmento de tubo de mayor diámetro que la perforación y posteriormente se insertó un segundo segmento de tubo del diámetro de la perforación. Se utilizaron dos dados matrices de acero que lo comprimían abriendo los extremos. Los bordes del tubo son forzados a deformarse girando 180 grados y comprimidos contra las paredes del perfil, el cual no se aplasta debido a la presencia del primer tubo. La presión fija este cilindro a las paredes del perfil creando un área reforzada (figura 8F). Algunos perfiles se forzaron a fallar y esta conexión mantuvo siempre su integridad. Este método se desarrolló para los perfiles de acero, pero sigue siendo válido para los perfiles de aluminio.

En la durabilidad de la estructura, otros puntos susceptibles fueron los extremos abiertos de los elementos tubulares. En la primera versión, los perfiles se dejaron abiertos y tendían a abrirse o aplastarse. En la versión 1 esto se solucionó introduciendo tacos de madera de alta densidad (zapatero) (figura 9A) en los extremos de los perfiles. Para la versión 1.1 se diseñaron piezas terminales que reforzaban los extremos de los perfiles y a la vez los rematan (figura 9B). En la versión de acero de la bóveda



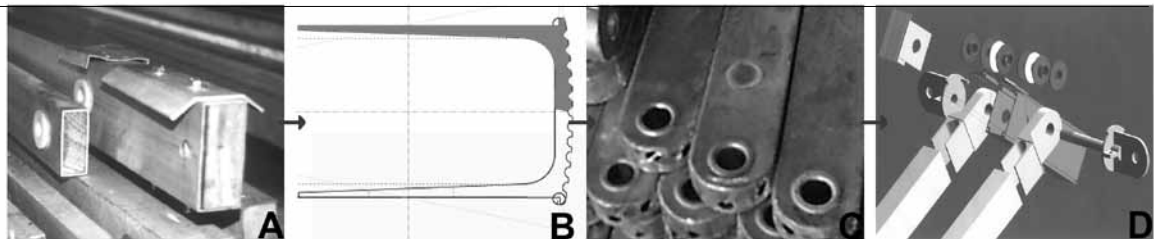
fue mas fácil soldar una chapa para cerrar el extremo del perfil. En los extremos de los perfiles que conformaban las tijeras que unen los arcos, la situación era más complicada ya que estos debían ser redondeados para permitir el giro de cerca de 90 grados que se requiere durante el despliegue. En las primeras versiones se cortaban sólo las esquinas del perfil. Para la versión del 2005 se desarrolló una herramienta de corte (ver más adelante en producción) (figura 9 C), Y para la versión 1.1 se propuso un terminal fundido (figura 9 D).

Otro de los accesorios de la estructura han sido los topes. Estos tienen la finalidad de alinear los perfiles y de evitar que el proceso de desplegado continúe más allá de la geometría que interesa (ver más arriba el esquema de despliegue). En las primeras versiones se usó una plancha de aluminio doblada sujeta a la extensión del perfil central mediante remaches (figura 10A), debido a fragilidad por pernos. Y en la versión 1.1 se usó un perfil extruído

que se fijó en la ranura del perfil central (figura 10C). En la versión de acero, el tope se simplificó a una plancha soldada al piso, con los bordes doblados para darle resistencia (figura 10B).

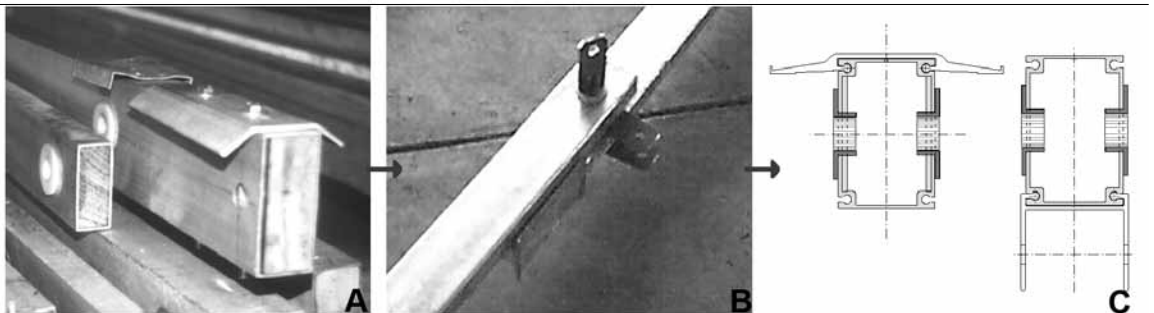
Las bases de la estructura (componentes de conexión con el terreno) fueron objeto de muchos cambios. Inicialmente se diseñaron para incorporarles unos patines que permitieran movilizar y desplegar la estructura sin grúa (figura 6H). Pero en el momento de su fabricación, debido a la disponibilidad de una pluma móvil, estos patines se eliminaron. Se construyeron las bases con pletinas fijas de aluminio que, al conectarse a una "U" de acero, formaban la base de la estructura que permitía su fijación al suelo (figura 11A). Esta alternativa tenía la desventaja de que en los procesos de transición las pletinas resultaron muy endebles. Y, por otro lado, la "U" se convertía en un elemento adicional de peso excesivo que había que transportar.

Figura 9  
Extremos



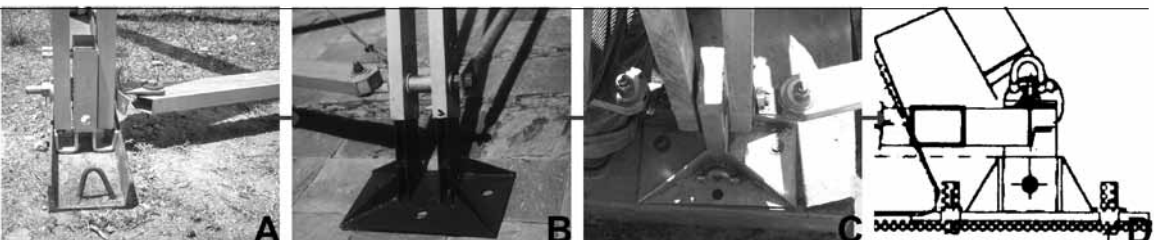
Fuente: elaboración propia

Figura 10  
Tope



Fuente: elaboración propia

Figura 11  
Bases



Fuente: elaboración propia



Tanto en las siguientes versiones del ESTRAN 1 como en el 1.1. se diseñó un componente para que actuara como remate del arco y a la vez de base de la estructura (figura 11B). Esta base permitía unir los dos extremos del arco, bloqueando la estructura. Permitía, así mismo, la incorporación de ruedas para la movilización de la estructura. y, finalmente, su fijación al suelo. Para el pabellón itinerante se diseñaron zapatas articuladas para el apoyo de la estructura en el piso, tanto en el comienzo del despliegue como durante su uso normal (figura 11C).

### Producción

Como se mencionó anteriormente, para la construcción del pabellón itinerante (figura 12) se trabajó en el desarrollo de los procesos y herramientas para la producción de este tipo de estructuras.

Por la experiencia adquirida durante la prueba de los primeros modelos, se sabía que la situación estructural más crítica de las bóvedas transformables se presentaba durante el proceso de despliegue. Esto impuso la necesidad de aumentar la rigidez transversal de las articulaciones y de los elementos estructurales para impedir su desalineación. También se debía suavizar el giro de las articulaciones para disminuir los momentos resistentes durante el despliegue.

El primer problema que se encaró fue el de la escogencia del material: aluminio *versus* acero. En una estructura trabajando fundamentalmente a flexión, el aluminio

representa 59% del peso de una estructura de acero de igual rigidez. El tamaño de la sección del perfil de aluminio es mayor, lo cual aumenta el espesor de la estructura plegada. El aluminio se puede proteger por un proceso de anodizado y provee un acabado muy estético. El perfil de acero requiere de un proceso de preparación para el galvanizado en caliente que presenta problemas al momento de culminar las articulaciones de la estructura. El costo del perfil de aluminio duplica el del perfil de acero. El costo de los remates de borde de los tubos de aluminio casi igualaba al costo del perfil mismo. Debido al tamaño de las secciones de aluminio necesarias y a las longitudes de tubo requeridas, se obtiene un desperdicio de aproximadamente 30% del material. Estas, entre otras más, fueron condicionantes iniciales para la escogencia del material.

Existía la posibilidad de disminuir la desventaja del largo de los tubos de aluminio encargando un lote de longitud especial a la planta extrusora. Pero eso retrasaría el proyecto considerablemente debido a los tiempos de espera. Finalmente, todos estos factores hicieron que se escogiera la opción de los tubos de acero para la fabricación de las siguientes bóvedas transformables.

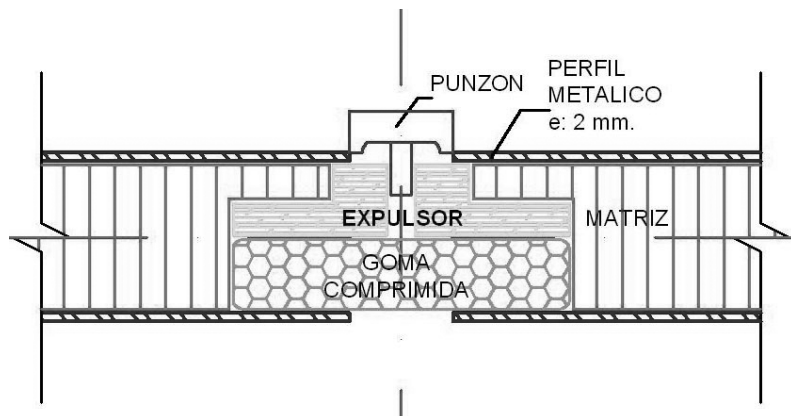
Una vez completado el diseño, se procedió al inicio de fabricación. Se encontró, no obstante, la dificultad de realizar las perforaciones para colocar los cojinetes de las articulaciones. El tubo de acero de pared muy delgada cedía y se deformaba a la presión de la broca de perforación. Esto se resolvió disponiendo un taco de madera dentro del tubo para apoyar las paredes. Sin embargo esta

Figura 12  
Pabellón itinerante  
utiliza dos módulos transformables  
con perfiles de acero



Fuente: elaboración propia

Figura 13  
Herramienta para la perforación de los perfiles



Fuente: elaboración propia

solución resultaba en un proceso muy lento, oneroso y no resolvía el problema del reborde de salida, el cual debía ser aplastado y luego rectificado con una fresa manual.

Por todo lo anterior se decidió diseñar un troquel de corte para hacer las perforaciones en la pared del tubo. El troquel consistió en una matriz que entra en el tubo y un punzón externo. Como las articulaciones centrales estaban a más de 1 metro del borde del tubo, no se pudo pensar en un troquel de tipo de cuello de cisne y se diseñó una forma de proveer la alineación necesaria del punzón con la matriz. En la figura 13 se observa que matriz y punzón se alinean mediante un vástago que atraviesa la pared del tubo.

El proceso resultó así:

- Perforación del hueco en la pared del tubo con una broca pequeña.
- Eliminación de rebordes de la perforación.
- Deslizamiento de la matriz dentro del tubo hasta llegar al lugar de la articulación.
- Alineación de la matriz con el punzón externo.
- Corte del hueco y retiro del desperdicio.
- Desarmar el punzón y proceder al siguiente hueco.

Estas operaciones se realizaron con un troquel simple (debiendo voltear el tubo para perforar la otra pared) por limitaciones de tiempo. La sugerencia es la construcción de un troquel doble para futuros desarrollos.

Se eliminó el proceso de soldadura para la fijación de los cojinetes a los tubos y se sustituyó por un proceso de deformación plástica por rebordeado, lo que disminuía la posibilidad de deformaciones térmicas, aumentaba la resistencia a la corrosión del conjunto y permitía utilizar secciones delgadas del tubo para los cojinetes disminuyendo el peso total de la estructura. Se construyó un tro-

quel para deformar un extremo del tubo del cojinete y un punzón para rebordear el otro extremo. Luego de montarlo en la viga, al probar el sistema, apareció otro problema: debido al poco espesor de las paredes del tubo de la viga, al apretar el tubo del cojinete, se deformaba el tubo de la viga y se producía desalineación. Este problema se resolvió, finalmente, usando un tubo-camisa que resistía las fuerzas de compresión del punzón rebordeador y rigidizaba todo el conjunto (figura 14).

Finalmente, se diseñó y construyó un dispositivo tipo compás para realizar los cortes de los extremos de las vigas de los brazos en forma curva, como lo exigía el diseño por razones estéticas y funcionales.

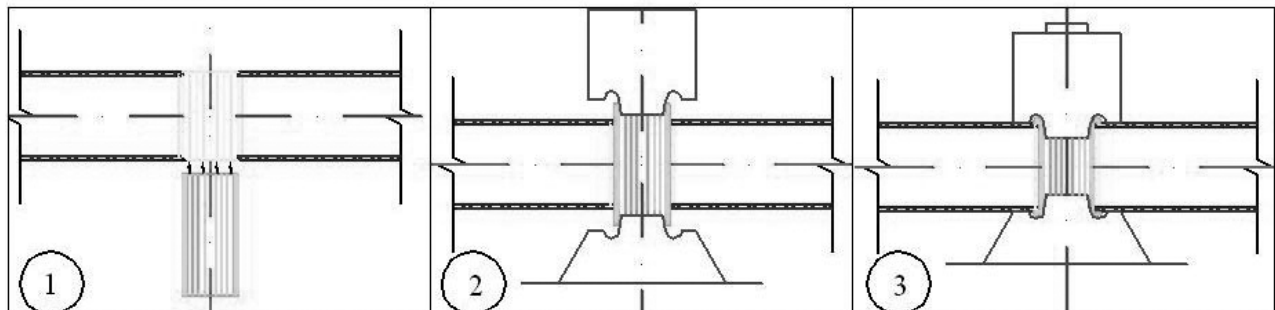
Para poder automatizar el proceso de construcción de este tipo de estructuras se diseñó y construyó una prensa móvil, tipo tijera, para realizar la perforación de los agujeros en los cojinetes y el montaje de los mismos. Por razones de tiempo de entrega de esta bóveda itinerante no se concluyó la construcción de la prensa sino hasta después de la ejecución final.

### A manera de conclusión

Los procesos de despliegue son claves en el diseño y la durabilidad de todo tipo de estructuras. En la sencillez de ese despliegue reside la competitividad de las estructuras transformables y, en particular, la de las bóvedas transformables.

Cuando se diseña una estructura de este tipo el método y los procesos de despliegue deben estar muy bien pensados ya que los mismos, como hemos visto con la experiencia presentada, imponen importantes reque-

Figura 14  
Proceso de elaboración del cojinete



Fuente: elaboración propia

rimientos geométricos y estructurales. En algunos casos los esfuerzos que se generan sobre los componentes de la estructura, durante el proceso de transformación, pueden ser mayores que los producidos por las mismas cargas de viento cuando la estructura se encuentra en configuración abierta. Durante las diferentes etapas del despliegue la estructura adopta configuraciones geométricas que no permiten asimilar adecuadamente este tipo de esfuerzos. Esto provoca que en las situaciones de despliegue la bóveda o la estructura sea muy susceptible a sufrir daños. Por lo tanto, unos detalles adecuadamente diseñados y ejecutados contribuyen al buen funcionamiento y a la durabilidad de la estructura. El desarrollo de métodos e implementos industriales de fabricación facilitan la consecución de detalles sencillos y eficaces y favorecen la reducción de los costos de producción.

De las observaciones que surgieron durante la construcción del pabellón itinerante (el último modelo mostrado en el presente trabajo) se desprende la propuesta de

estandarizar a uno o dos tipos los perfiles tubulares para facilitar la construcción del herramental necesario para la producción. Asimismo, el diseño de un sistema de bloqueo para la estructura plegada, así como el desarrollo de puntos de amarre y de rodaje para el manejo de la estructura en almacén.

Unas palabras finales. Las estructuras transformables son un aporte clave que abre fronteras en la arquitectura. Estas estructuras muestran la factibilidad de una arquitectura móvil y transfigurable. Además, se adaptan a las condiciones ambientales existentes. Demuestran, igualmente, que es posible construir estructuras portátiles y plegables de una forma sencilla, que permiten ser manipuladas fácilmente y diseñadas con gran eficiencia estructural, dando un gran impulso al desarrollo de esta tecnología. El camino iniciado en el IDEC con esta experiencia no es más que los primeros pasos pioneros en esta materia. Largo trabajo queda por delante para consolidar lo avanzado.

## Referencias

- Escrig F. (1984) "Estructuras Espaciales de Barra Desplegables" *Informes de la Construcción*, Vol 36, #365, Noviembre.
- Esgrig F. y Valcárcel P. (1987) "Curved Expandable Grids". En: *Non-Conventional Structure Proceedings*, pp. 157-166. London.
- Hernández, C. (1987) *Deployable Structures*. Tesis M.I.T., Boston, Cambridge.
- Hernández C. (1997) *Estructuras Transformables*, Trabajo de Ascenso. Caracas: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.
- Monjo J. (1990) "Introducción a la Arquitectura Textil". *Cubiertas Colgadas*. Editor: Textos de Arquitectura, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Diciembre.
- Sánchez-Cuenca L. (1996) "Geometric models for expandable structures". *Mobile and Rapidly Assembled Structures II*. En: MARAS 96. Editors: F. Escrig and C.A. Brebbia. pp. 93-102. June