

DESARROLLO DE ESTRUCTURAS TRANSFORMABLES: ESTRAN 1

Carlos Henrique Hernández



RESUMEN

Las investigaciones conocidas sobre estructuras transformables, usualmente se han restringido a resolver aspectos tales como: su formulación matemática y la cinemática asociada al pliegue y despliegue de la estructura. Con el objeto de demostrar su factibilidad de aplicación –económica, constructiva y operativa–, nuestra investigación hace énfasis en otros aspectos no suficientemente explorados: costos, materiales, diseño de juntas, accesorios y manejo mecánico de las operaciones de pliegue y despliegue. ESTRAN conforma un conjunto de estructuras transformables basadas en el sistema de «tijera» que se desarrollan en el IDEC-FAU, cuyos criterios de diseño son: economía, sencillez constructiva, componentes nacionales o de fácil fabricación. Partiendo de las experiencias obtenidas del diseño, fabricación y aplicación del ESTRAN 1, surge el ESTRAN 1.1. Los procesos y las conclusiones que surgen de él se describen en el presente trabajo.

ABSTRACT

Known researches about deployable structures, have usually restricted themselves to solve such aspects as: mathematical formulation and kinematics associated to the plying and deploying of the structures. With the object of demonstrating their application factibility –economical, constructive and operative– our research emphasises on some other aspects non-sufficiently investigated: costs, materials, joint designing, accesories and mechanical managing of the plying and deploying operations.

ESTRAN shapes a group of deployable structures based on the "scissors" principle, which are developed at the IDEC-FAU. Their design criteria is based on: economy, constructive simplicity, national existing or easily fabricated components. Starting from prior experiences obtained by the design, fabrication and application of ESTRAN 1, appears ESTRAN 1.1. Process and conclusions are described in the following work.

INTRODUCCIÓN

El uso de estructuras transformables (desplegables) comenzó en la antigüedad: las carpas livianas y *teepees* de las tribus nómadas eran plegables y transportables. Las ventajas principales de las estructuras transformables son su reutilización, el poco volumen que ocupan durante su almacenamiento y transporte y la facilidad y rapidez de montaje.

El atractivo de la idea de la transformación estructural y las expectativas creadas por su utilización práctica en los nuevos usos y demandas de un ambiente económico y tecnológico contemporáneo, conllevaron recientemente a un nuevo interés por la vieja idea; su renacimiento fue estimulado por los trabajos y conceptos vanguardistas de E. Pérez Piñero y R. Buckminster Fuller.

Este trabajo se comenzó en 1987 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts bajo la tutoría del doctor Waclaw Zalewski, quien había estado trabajando sobre algunas ideas de estructuras transformables basadas en barras. Por otro lado existía ya un grupo importante de contribuciones realizadas por diversos investigadores, que reflejan cierto interés especializado en la teoría de la transformación estructural. No obstante, en la mayoría de los casos estas investigaciones se han enfocado en problemas similares y relativamente limitados, tales como la formulación matemática de los límites geométricos y mecánicos y la cinemática de los eventos asociada con la evolución de la estructura desde su forma compacta hasta su forma final.

Más escasas eran, sin embargo, las proposiciones y los estudios realistas de carácter más amplio, más directamente relacionados con el desarrollo, planificación y montaje de estructuras económicas, fáciles de cons-

DESCRIPTORES:

Formas estructurales;
Estructuras transformables;
ESTRAN; Estructuras plegadas.

truir y útiles, que resistan las diferentes cargas de transporte y servicio. En respuesta, nuestra investigación hace énfasis principalmente en áreas poco exploradas, como la factibilidad económica y funcional de las estructuras desplegables; la clasificación y selección de los tipos y materiales; el diseño de juntas y otros accesorios metálicos; la mecánica y el manejo de las operaciones de despliegue y repliegue con el objetivo de demostrar la factibilidad de las estructuras transformables, tanto constructivamente como en su manipulación y aplicación.

FUNDAMENTO DEL DISEÑO

Se denomina ESTRAN a un grupo de diseño de estructuras transformables basadas en el sistema de tijera concebido en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción con la colaboración del doctor Waclaw Zalewski. Estas estructuras se diseñaron y construyeron con el objetivo de ensayar los conceptos surgidos durante el estudio de estructuras transformables tipo tijera [1] [3] (fig. 1) utilizando modelos a escalas reducidas que habían sido desarrollados en el Instituto Tecnológico de Massachusetts por Zalewski y el autor. El objetivo específico fue determinar y resolver problemas constructivos, de manejo, de estabilidad tanto estructural como frente a factores ambientales, resistencia al desgaste por uso y aceptación por los usuarios potenciales.

El diseño de la estructura se basa en criterios de economía y de sencillez constructiva, utilizando elementos ya existentes en el mercado nacional o de muy fácil fabricación. Se dio inicio a la fabricación tomando en cuenta que sería realizada directamente por nuestro equipo interno, sujeta a los recursos disponibles en nuestro taller, y en conocimiento de que la importancia del prototipo radicaba en su comportamiento geométrico y de ma-

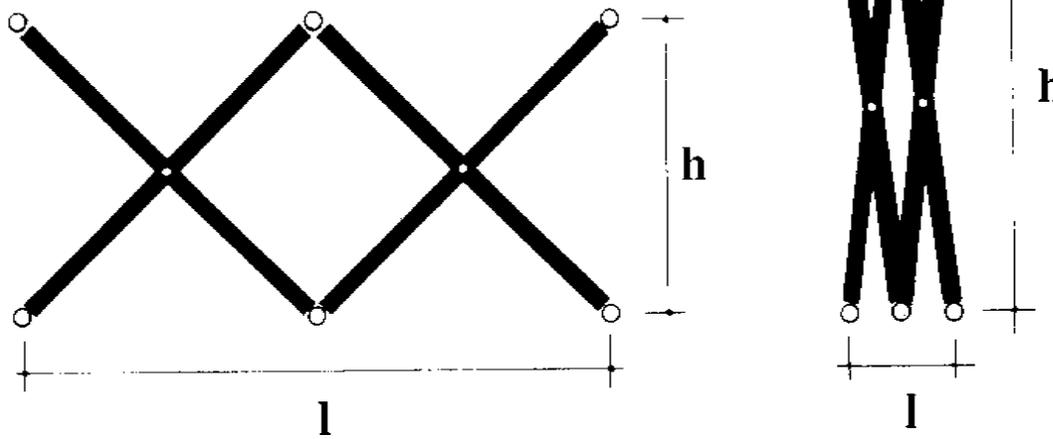
ESTRAN 1



nipulación más que en los detalles constructivos. Posteriormente, con base en las experiencias obtenidas con esta primera versión, en las sucesivas modificaciones y adiciones que sufre a lo largo del proceso de ensayo se diseña una estructura con elementos constructivos que requieren mayor intervención industrial: surge así el ESTRAN 1.1. Esta estructura, a diferencia de la anterior, se dirige al mercado exterior, más exigente en acabados y con regulaciones más estrictas.

Se utilizó el aluminio para mantener el peso de la estructura en el menor rango posible, facilitar su manejo y aumentar su resistencia a la intemperie. Como forma estructural fue seleccionada la bóveda cilíndrica de marcos no triangulados, ya que esta geometría es una de las formas más sencillas de construir. Un mayor número de elementos de dimensiones iguales, nodos más simples y una geometría totalmente compatible (fig. 2), le otorgan ventajas sobre otras configuraciones y formas estructurales. [4] [1]

FIGURA 1 Sistema de tijera



Esta geometría no se triangula a través de sus elementos rígidos, por lo que requiere de la incorporación de tensores, que actúan sólo en el momento en que la estructura se encuentra completamente desplegada. Esto hace que la estructura sea inestable durante las etapas intermedias del proceso de plegado y desplegado, condición que se contrarresta con un menor peso y conexiones más simples.

En ensayos realizados con la manipulación manual de los perfiles, se determinó que para el fácil manejo y movilización de la estructura el largo máximo de los elementos era de 4,5 m. Elementos más largos mostraron ser difíciles de controlar por los operarios durante el transporte y el despliegue de la estructura. La desventaja de esta dimensión es su incompatibilidad con la medida estándar de los perfiles (6,10 m), lo cual genera desperdicio; sin embargo, medidas más cortas (como 3 m) ameritarían un mayor número de nodos y brazos para las mismas luces, aumentando el peso de la estructura.

FIGURA 2
Bóveda cilíndrica

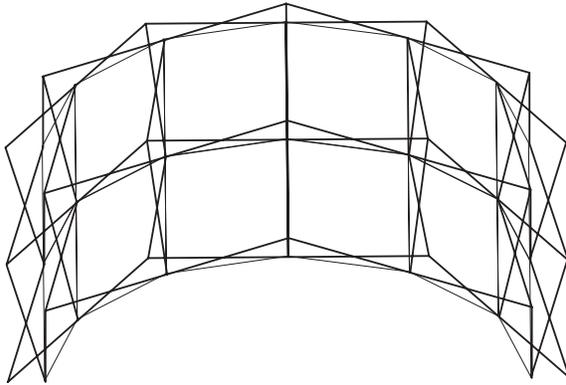
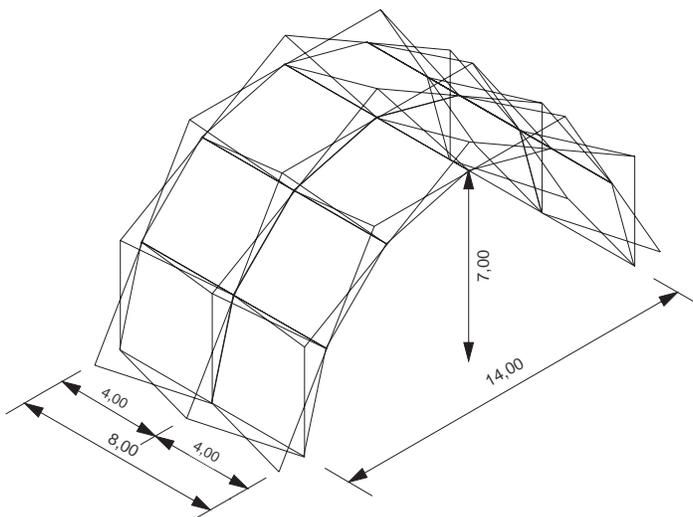


FIGURA 3
Dimensiones ESTRAN 1



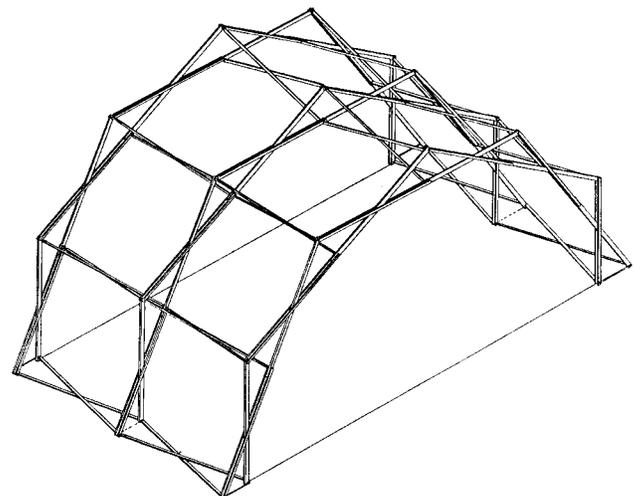
Las dimensiones de la estructura son determinadas por las reglas geométricas que deben seguir estas estructuras para que puedan plegarse [1] [5]. Para la bóveda cilíndrica, las dimensiones de la malla se calculan usando la fórmula de la fig. 15, donde R se define de acuerdo con la luz a cubrir. También se define el número de divisiones o ángulo θ que va a determinar la longitud de los perfiles. En nuestro caso, R se tomó como 7 m, ya que en el momento en que se estaba diseñando la estructura las Fuerzas Armadas tenían interés en usarla para hangares portátiles de aviones de combate, para lo cual se adaptó a la dimensión de 14 m de luz.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Como se mencionó anteriormente, el ESTRAN 1 fue diseñado como una retícula espacial transformable, generada sobre un cilindro, que desplegada tiene 8 m de profundidad por 14 m de luz producida por una bóveda de 7 m de radio, creando un área cubierta de 112 m². Al plegarse, sin embargo, conforma un paquete compacto de 4,2 m x 1 m x 1 m, con un peso de 500 kg (fig. 3).

Esta estructura (fig. 4) está 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 está constituido por seis ensamblajes tipo tijera, cada uno formado por perfiles lineales de aluminio de sección rectangular, un perfil central de mayor sección (45 mm x 100

FIGURA 4
Estructura ESTRAN 1



mm) A1 y dos perfiles exteriores, uno a cada lado del anterior de menor sección (32 mm x 75 mm) A3, todos pivotando sobre un eje común en un mismo plano. El elemento central A1 se conecta con los elementos externos A3 del ensamblaje de tijera siguiente a través del nodo N1, en el caso de elementos del arco central y del nodo N2 para elementos de los arcos externos. Igualmente, los elementos externos A3 del primer ensamblaje se conectan al elemento A1 del siguiente ensamblaje, y en un proceso similar, los extremos de los perfiles de la segunda tijera se conectan con la siguiente hasta completar las seis tijeras que forman cada arco. Los brazos están formados por dos perfiles lineales de sección rectangular de 32 mm x 75 mm B1 que pivotan sobre un eje central, los extremos de los elementos B1 se unen a los arcos sobre los nodos N1 o N2 y pivotan sobre las aletas terminales, mientras los elementos B1 se unen en un extremo con la posición alta de un arco y en el extremo opuesto en la baja del arco siguiente. Estos elementos conforman la retícula de base cuadrada, la cual es triangulada por tensores en el plano superior, fijados sobre los nodos N1 o N2.

CONSTRUCCIÓN

Inicialmente construimos la armadura con perfiles de aluminio tubulares de 32 mm x 75 mm y 45 mm x 100 mm, con un espesor de pared de 1,7 mm y 2 mm, respectivamente. Luego se modificó, sustituyendo estos perfiles por unos de igual sección exterior pero con espesores de pared de 2 mm y 2,2 mm (fig. 5), debido a que los primeros perfiles resultaron ser muy débiles para resistir la manipulación y transporte a los que fue sometida la estructura durante los seis primeros años de construida. Los perfiles exteriores comenzaron a presentar abolladuras y los perfiles de los brazos resultaron muy susceptibles a deteriorarse cuando algún tensor se enredaba (fig. 6).

Otros puntos susceptibles son los extremos abiertos de los elementos tubulares, los cuales tienden a abrirse o aplastarse. En la versión 1, esto se solucionó introduciendo tacos de madera de alta densidad (zapatero) (fig. 7) en los extremos de los perfiles. Para la versión 1.1 se diseñaron piezas terminales que refuerzan los extremos de los perfiles y a la vez los rematan (fig. 8). También los perfiles sufrieron modificaciones: se sustituye el perfil estándar por un perfil especial con paredes de mayor espesor, con unas ranuras en las esquinas que permiten la colocación de los accesorios para colgar la cubierta y los topes. Asimismo, se redondearon las esquinas para abrir la posibilidad de colocar la cubierta sobre la estructura (ver cubierta) y se distribuye la cantidad de metal a manera de favorecer el comportamiento estructural de los perfiles (fig. 9).

FIGURA 5
Perfiles aluminio ESTRAN 1 versión inicial

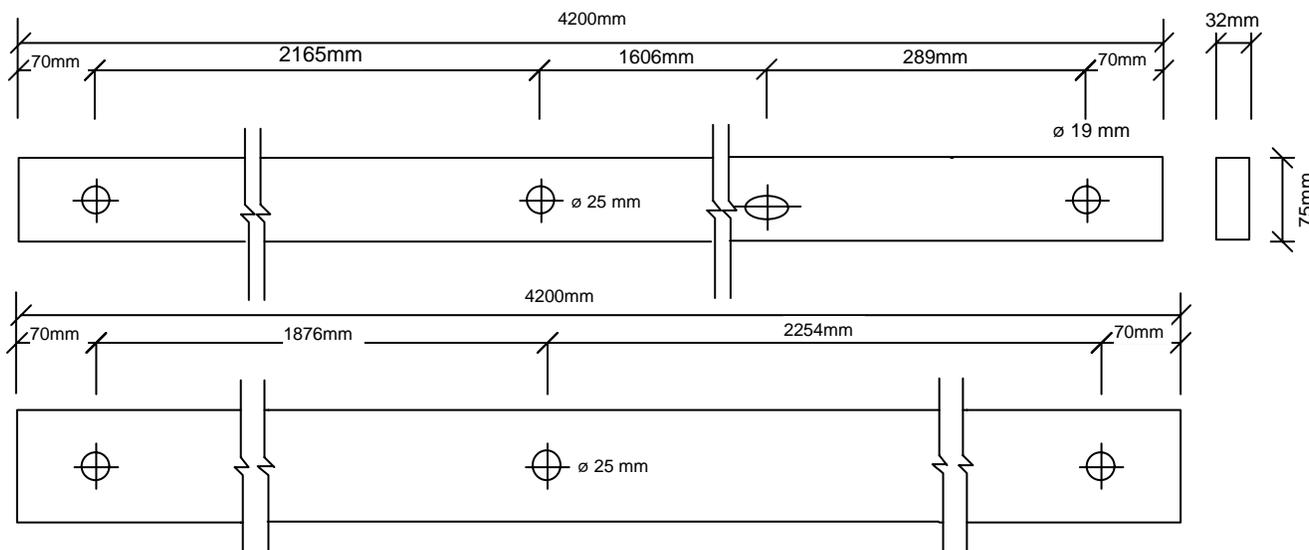


FIGURA 6
Daño a los perfiles

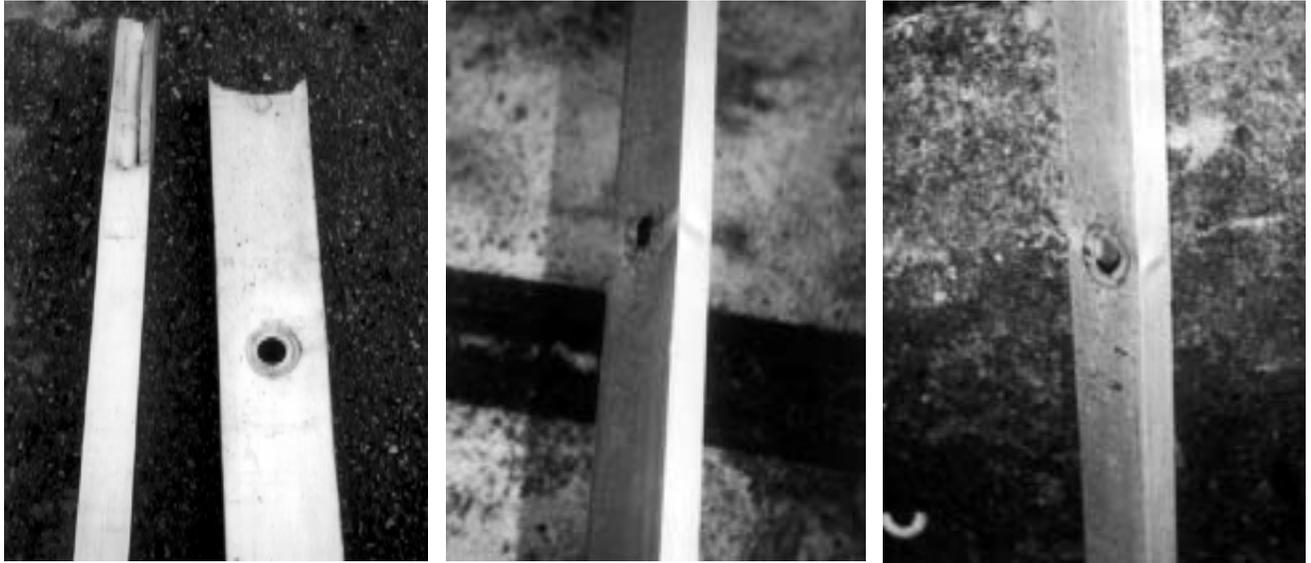


FIGURA 7
Tacos de refuerzo de los extremos



FIGURA 8
Terminal de remate ESTRAN 1.1

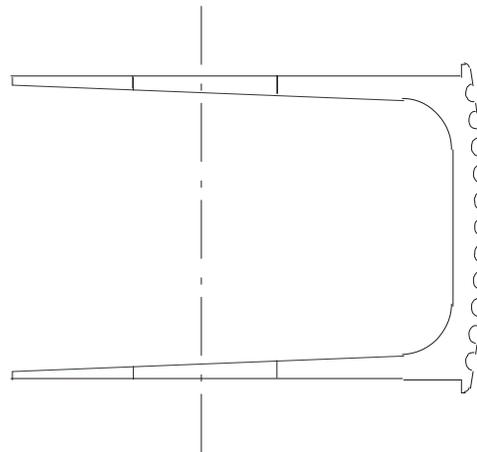
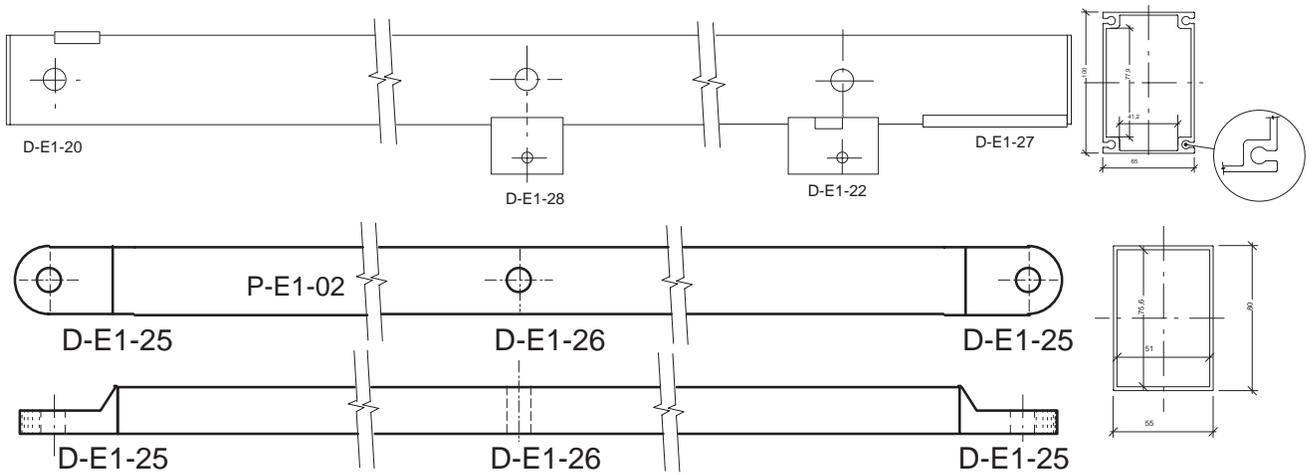


FIGURA 9
Perfiles de aluminio ESTRAN 1.1



En el ESTRAN 1 se usó la aleación 6063 (utilizada para los perfiles que se encuentran en el mercado); posteriormente, para la versión 1.1 se estipuló la aleación 6261 de alta resistencia, que permite aumentar la resistencia de los perfiles sin incrementar su peso.

Los conectores o nodos de la primera versión se construyeron en acero y luego se galvanizaron. Existen sólo dos tipos de conectores en las diferentes versiones de esta estructura: en primer lugar, el conector de los arcos exteriores, formado por un eje axial de Ø19 mm terminado en un extremo con una aleta que recibe uno de los extremos de los brazos que unen los arcos y en el otro extremo, la barra roscada que recibe dos tuercas (una que fija el conector en posición y la otra que fija los elementos de refuerzo y de bloqueo en la cara lateral de la estructura) (fig. 10). Luego tenemos el conector central, que se diferencia del exterior en que sus extremos terminan en aletas que permiten la conexión con los brazos perpendiculares (fig. 11). Una de estas aletas es removible, para permitir el ensamblaje, y se fija con dos tornillos de 1/4" que la atraviesan perpendicularmente. Esta conexión se sustituye posteriormente con una roscada (fig. 12) más resistente, agregando también al conector los puntos de fijación de los cables, y en la versión 1.1 (fig. 13) se agregan topes para limitar el movimiento de los

conectores y reducir los esfuerzos de torsión a ser soportados por los perfiles de los brazos en las versiones anteriores. Estos topes generan 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 aíslan de los conectores de acero mediante bocinas que reducen el roce entre los componentes móviles y a la vez evitan 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 (fig. 14). Sin embargo, al cabo de un tiempo (50 aperturas) el borde del perfil comenzaba a «cortar» el poliuretano, produciéndose excesivo «juego» en las uniones, que ocasionaba daños a los perfiles y afectaba el funcionamiento de la estructura (fig. 15). Para las siguientes versiones se fabricó una bocina de nylon (fig. 16), por ser éste un material rígido, de mayor dureza que el poliuretano, menos propenso a cortarse y muy liso, lo que reduce la fricción entre las partes móviles. Esta bocina se diseñó de forma tal que también sustituyera las arandelas plásticas.

FIGURA 10
Nodo exterior ESTRAN 1V1

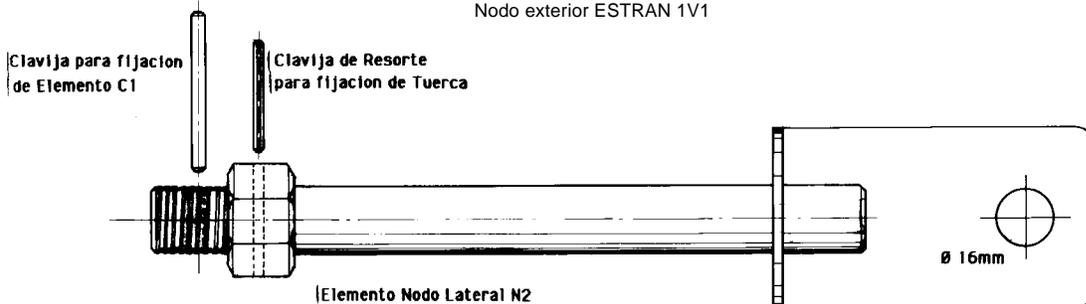


FIGURA 11
Nodo interior ESTRAN 1V1

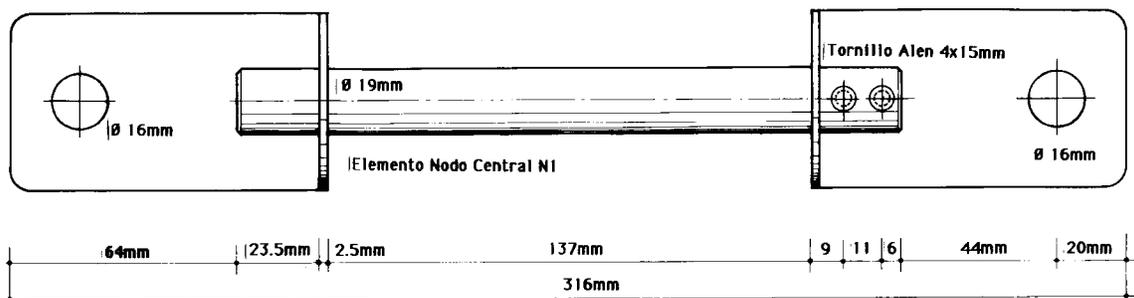


FIGURA 12
Nodos ESTRAN 1V2

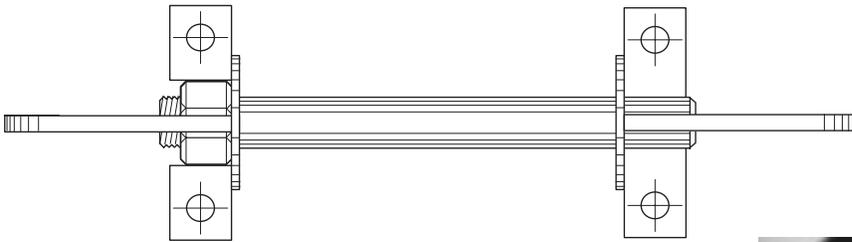


FIGURA 13
Nodos ESTRAN 1.1

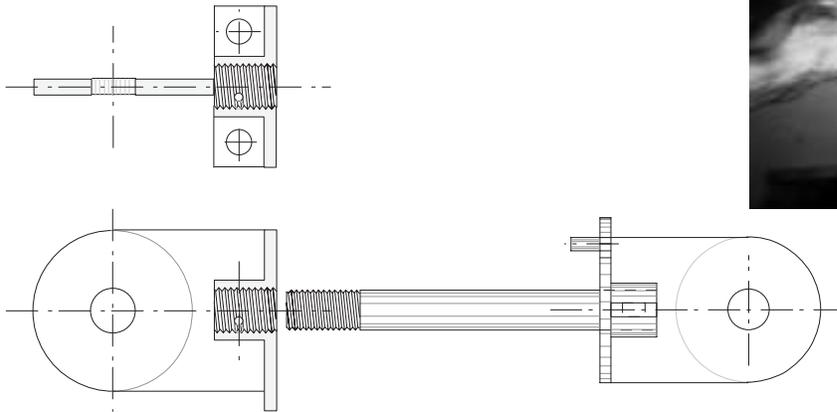


FIGURA 14
Unión central ESTRAN 1V1

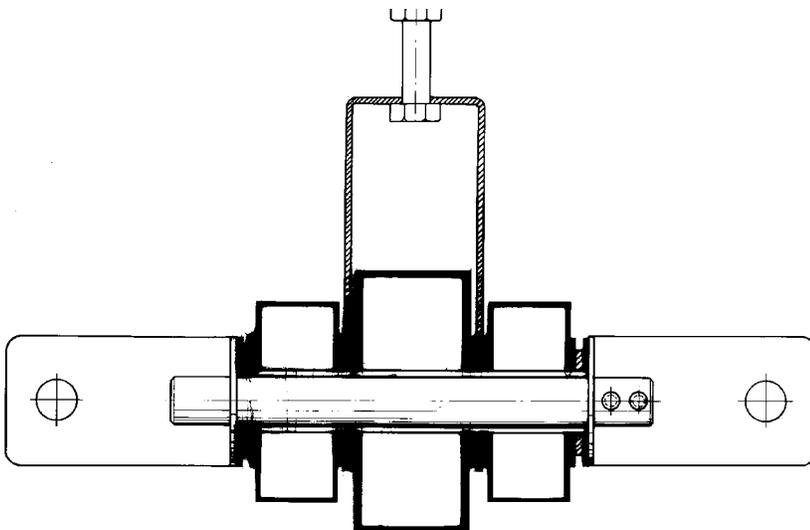
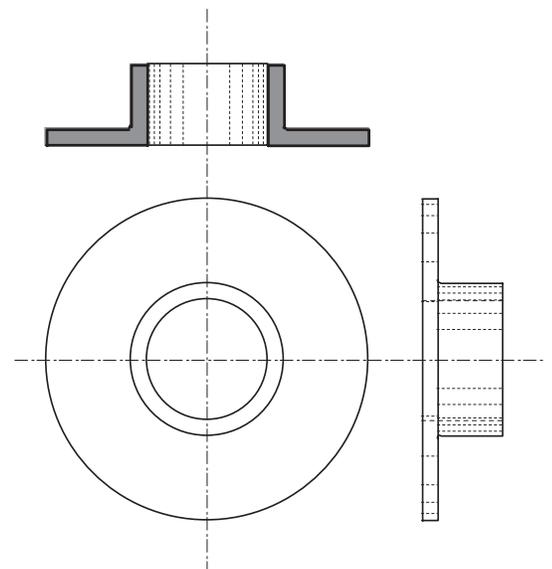


FIGURA 15
Bocina de poliuretano dañada



FIGURA 16
Bocina de nylon



Con estos conectores se arman los diferentes tipos de uniones, las cuales varían según su posición en la estructura al incorporarle otras piezas que actúan como elementos de fijación de la cubierta o como piezas de sujeción para los polipastos o la grúa utilizados en los procesos de plegado y desplegado (fig. 17). El eje del conector atraviesa los tres perfiles que forman los arcos de la estructura, creando el eje de giro. Los perfiles se mantienen en posición al cerrarse el conector con las aletas terminales, que reciben los extremos de las tijeras o brazos que conectan los arcos entre sí; los extremos de estas tijeras pivotan sobre el eje o perno que lo amarra a la aleta del conector.

En la versión 1.1, el eje del conector es más corto y de mayor diámetro (22 mm). Esta modificación se realizó para reducir los esfuerzos de excentricidad que se producen en el conector por la desviación que hay entre el punto de confluencia teórico de las fuerzas que se transmiten a través de los brazos y el punto real de fijación de éstos. Asimismo, los cables se conectan directamente sobre la cabeza del conector a través de grilletes, lo que permite llevar las fuerzas de forma más directa al conector y, por otro lado, facilita el montaje o sustitución de los cables (fig. 18). Entre los perfiles del arco se deja un espacio donde se fijan los elementos accesorios; en el caso de no haberlos, el espacio es ocupado por arandelas metálicas. Así conseguimos mantener la separación entre los perfiles, que siempre deben llegar perpendicularmente al eje de rotación.

FIGURA 17
Uniones

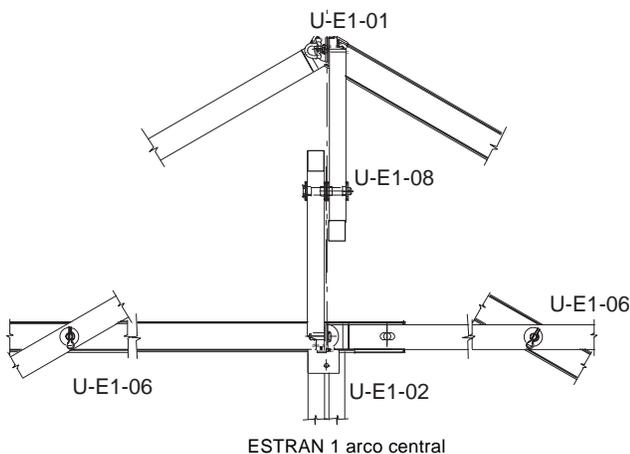
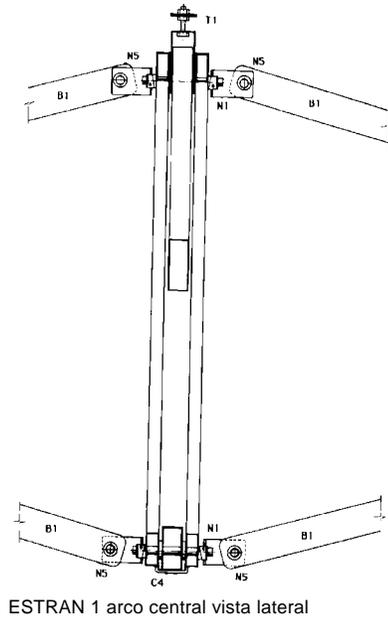
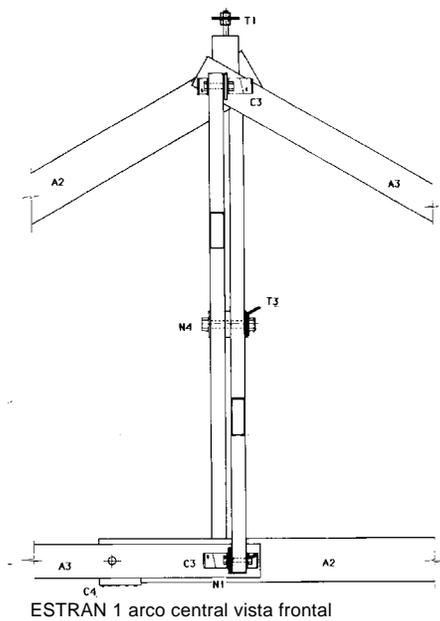
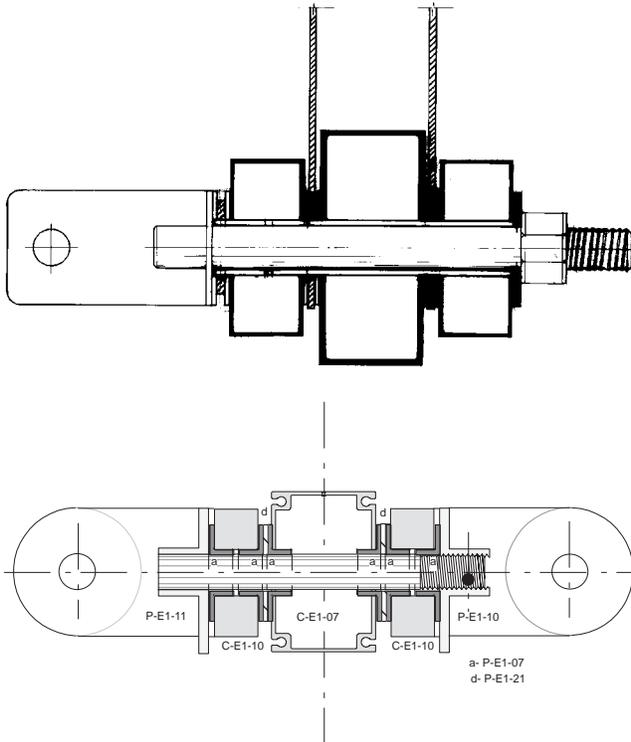


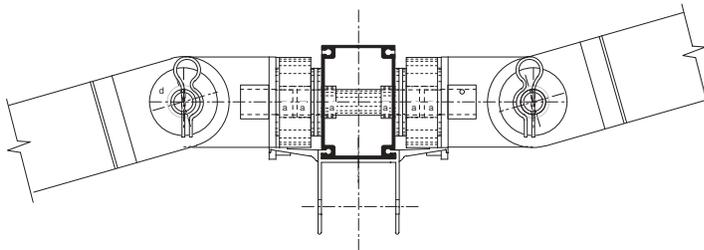
FIGURA 18
Sección Uniones



Los conectores de la zona interior de la bóveda poseen una pieza adicional conformada por dos placas unidas por una barra (fig. 19). Esta pieza se fija entre los perfiles del arco sobre el eje del conector y va a servir como punto de colgado de la cubierta. Con esa manera de construir este elemento se logró que cuando la estructura se pliegue éste no obstaculice el movimiento de los perfiles. En el caso del ESTRAN 1.1, la pieza de colgado se fija sobre la ranura, que para este fin tiene el perfil central y no sobre el conector. En las primeras versiones, donde se pensó colocar la cubierta sobre la estructura y no colgada, se planteó el uso de una pieza (T1) que retiene la cubierta entre dos anillos a presión y permite el apoyo de ésta sobre cada uno de los conectores de la cara exterior de la bóveda.

Otro accesorio de la estructura son los topes, cuya finalidad es alinear los perfiles y evitar que el proceso de desplegado continúe más allá de la geometría que nos interesa (ver esquema de despliegue). En las primeras versiones son una plancha de aluminio doblada sujeta a la extensión del perfil central mediante remaches. Debido a la fragilidad por pernos, en la versión 1.1 es un perfil extruido que se fija en la ranura del perfil central (fig. 20).

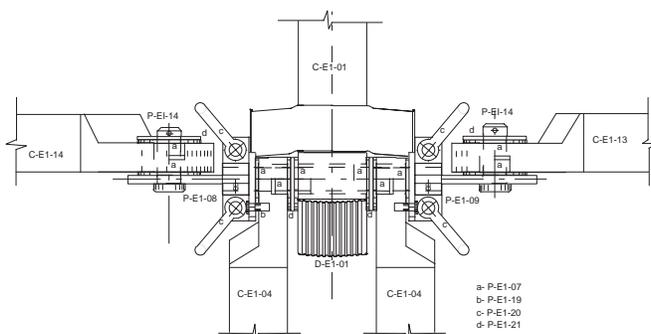
FIGURA 19
Conexión para cubierta



Topes ESTRAN 1 V1



FIGURA 20
Topes



Topes ESTRAN 1 V2



Los nodos de los arcos exteriores permiten la conexión de barras, que van a servir como elementos de refuerzo y como elementos de trabado una vez que la estructura se ha desplegado. En el ESTRAN 1 el eje roscado del nodo recibe esta barra perforada que se fija con una tuerca. En el ESTRAN 1.1 la barra se fija sobre la aleta del nodo mediante dos pasadores (fig. 21). Para permitir la manipulación de la estructura con una grúa se colocó en todas las versiones un gancho en la unión superior del arco central, en el eje de despliegue de la estructura, fijado directamente sobre el eje del nodo mediante dos planchas perforadas que pasan entre los perfiles. Los elementos de tijera que conforman tanto los brazos como los

arcos de la estructura tienen un eje central de pivote. En la primera versión se utilizó una barra roscada de aluminio (19 mm) sujeta por dos tuercas también del mismo material. Este eje atraviesa los perfiles protegidos por las bocinas de nylon. Las tuercas, que no pueden ser apretadas porque dañarían los perfiles y dificultarían su pivote, se fijan en su posición por cupillas que atraviesan la barra. Posteriormente, las cupillas fueron sustituidas por un compuesto que fija las tuercas sometidas a movimiento o vibración (*locktite*), lo que requería menor trabajo. En la versión 1.1 se sustituyen por un pasador de aluminio fijo con una cupilla, componente más adecuado para la función a cumplir y de más fácil montaje (fig. 23).

FIGURA 21
Conexión de la barra de refuerzo

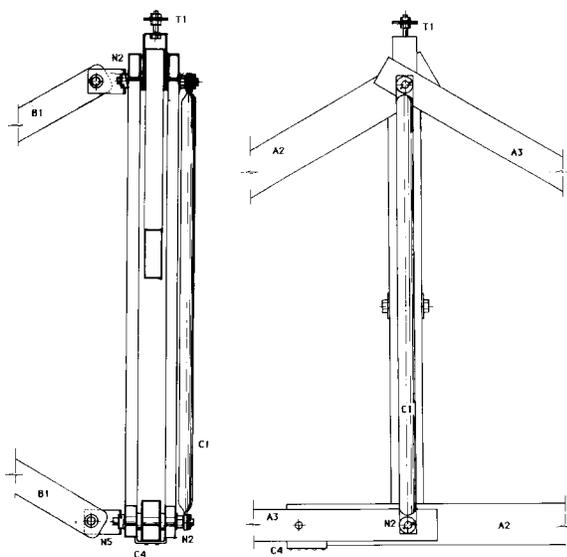


FIGURA 22
Conexión grúa

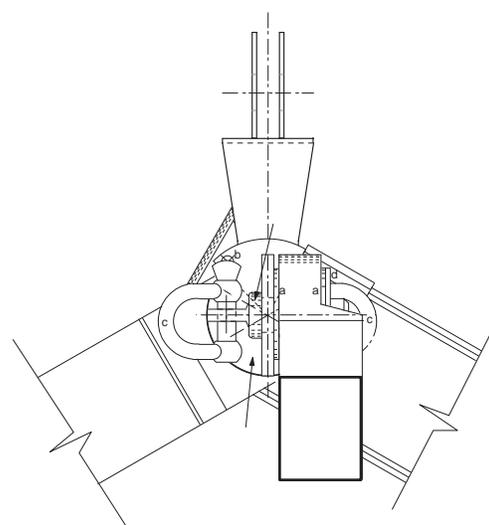


FIGURA 23
Ejes unión de tijera

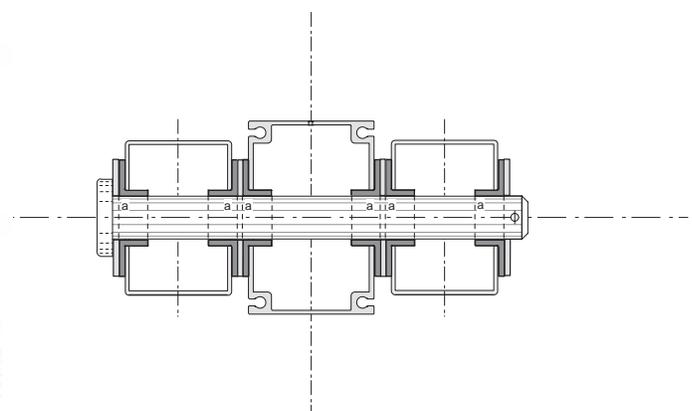
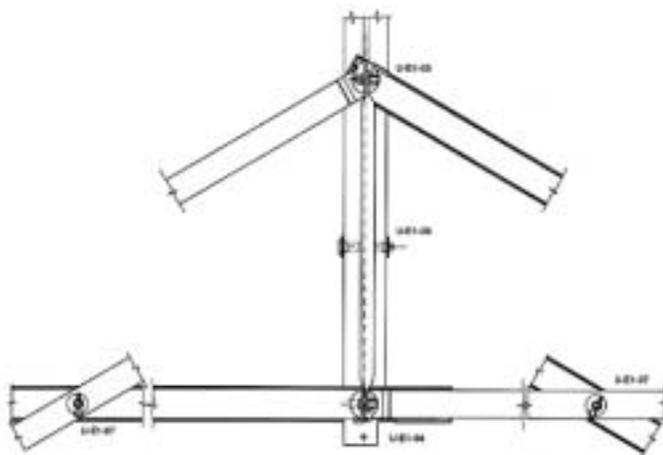
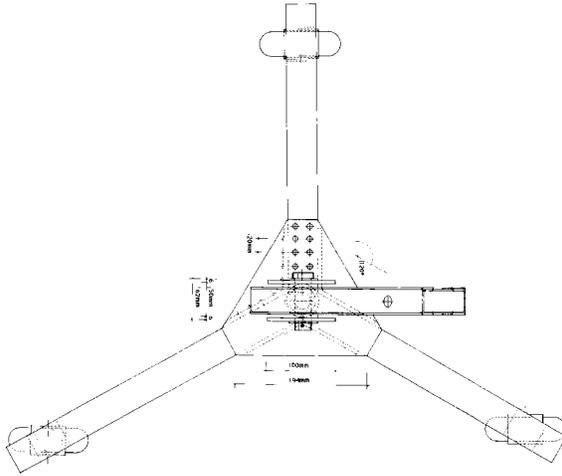


FIGURA 24
Patines de despliegue V1

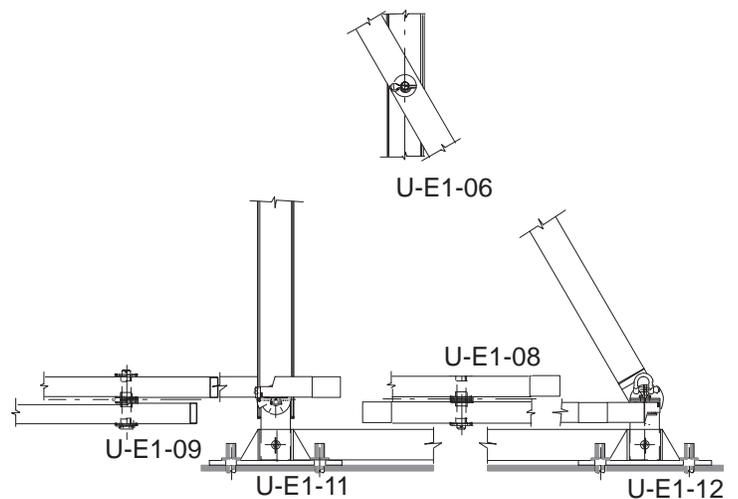
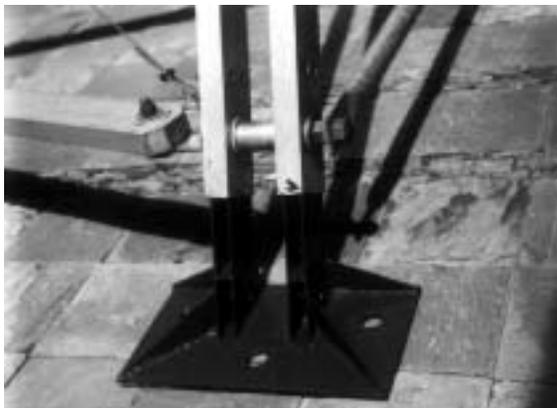


Las bases de la estructura (componentes de conexión con el terreno) han sido objeto de muchos cambios. Inicialmente se diseñaron para incorporarles unos patines que permitieran movilizar y desplegar la estructura sin grúa (fig. 24), pero en el momento de su fabricación, debido a que se tenía acceso a una pluma móvil, estos patines se eliminaron y 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 (fig. 25). Esta alternativa tenía la desventaja de que en los procesos de transición las pletinas resultaron muy endebles y, por otro lado, la «U» era un elemento adicional de peso excesivo que había que transportar. Tanto en las siguientes versiones del ESTRAN 1 como en el 1.1 se diseñó un componente que actuara como remate del arco y a la vez de base de la estructura (fig. 26). Esta base permite unir los dos extremos del arco, bloqueando la estructura; permite asimismo la incorporación de ruedas para la movilización de la estructura y finalmente su fijación al suelo.

FIGURA 25
Base ESTRAN 1



FIGURA 26
Bases ESTRAN 1 V2 y ESTRAN 1.1 (dibujo)



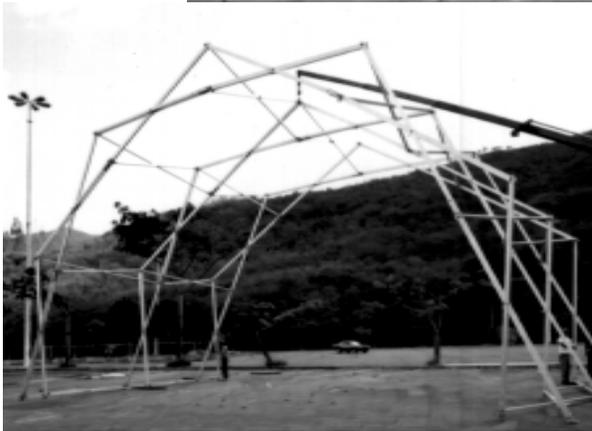
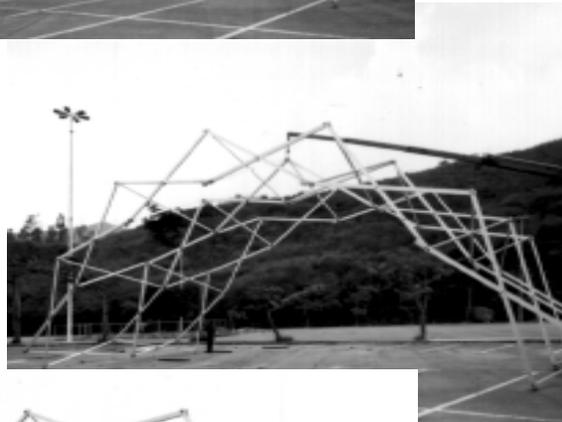
MONTAJE DE LA ESTRUCTURA

El proceso de montaje de una estructura transformable como el ESTRAN, es un elemento clave para su éxito. La manipulación de la estructura: su almacenaje, transporte, montaje y desmontaje han aportado mucha información sobre el comportamiento de los diferentes componentes de ésta. Sobre la base de tal información se han producido las diferentes versiones del ESTRAN.

La primera versión del ESTRAN fue concebida para ser montada sin ayuda de grúa, por lo que en los primeros dibujos aparecen los patines sobre los cuales se coloca el paquete de la estructura plegada. La disponibilidad de una grúa incorporada al camión de transporte permite que se trabaje inicialmente mediante manipulación mecánica. Para ello se coloca un gancho en el nodo superior central de la estructura que permite el colgado del paquete estructural, definiéndose el siguiente procedimiento de montaje (fig. 27): la estructura plegada es transportada horizontalmente en la batea del camión sobre cuarterones de madera que protegen los componentes de aluminio de dañarse. Se coloca el camión a 11 metros del punto central de la ubicación prevista para la estructura, se procede a levantar el paquete, llevándolo a posición vertical, y luego se desplaza hasta el punto designado, manteniéndolo a 30 cm del suelo (a) (esto permite que ningún elemento toque el suelo en la primera etapa del despliegue). Se prosigue halando en dirección diagonal y hacia afuera los cuatro perfiles que forman las esquinas del paquete, alejándose del centro de éste (b c d) (fig. 28). Esta operación se continúa hasta que la estructura comienza a levantarse en el centro; en este momento la grúa debe comenzar lentamente a elevarse y el proceso de halado a revertirse, pero en este caso se empuja siguiendo la dirección del arco que comienza a formarse y no en la dirección diagonal precedente (e f). Si este proceso se hace antes de tiempo, la estructura se cierra en lugar de abrirse y habría que retroceder al paso anterior. Especial cuidado debe tenerse

FIGURA 27
Despliegue ESTRAN 1





con el área central del arco, que tenderá a moverse fuera del plano, por lo que es recomendable empujar o halar la estructura según sea necesario para mantener los arcos dentro de su plano. La estructura se despliega hasta que los topes en los perfiles de aluminio impidan continuar el despliegue. En este momento la estructura se baja para que se apoye sobre el suelo (a). Si la grúa puede permanecer con la estructura colgada por más tiempo se puede proceder al trabado de las patas, aunque no es indispensable hacerlo antes de que se apoyen en el suelo.

La conformación geométrica de la estructura induce a que el movimiento de despliegue, en su fase inicial, sea un proceso de crecimiento o expansión en el plano horizontal de los dos ejes coordinados partiendo del eje central del paquete que actúa como foco de expansión; esto hace que el paquete crezca de su medida inicial compactada de 0,80 x 0,80 m en el plano horizontal, a 20 x 8 m (fig. 29). Los veinte metros corresponden al desarrollo del arco que se formará al continuar el proceso de despliegue, que se inicia a partir de ese momento: un movimiento de elevación de la zona central de la estructura para llegar a su altura máxima de 7 m y un movimiento horizontal hacia el centro de los extremos de la estructura, tendiendo a cerrar el arco.

Durante el proceso de despliegue, la estructura es inestable en el plano horizontal, debido a la escogencia de los tensores como recursos de triangulación que, como vimos anteriormente, no entrarían a funcionar hasta que se haya logrado el despliegue total. La estructura tenderá, por lo tanto, a producir desplazamientos diferenciales en este plano. Estos movimientos deben ser controlados, ya que podrían dañar la estructura durante el despliegue. Esta maniobra se realiza con un

FIGURA 28
Esquema de despliegue. Isometría

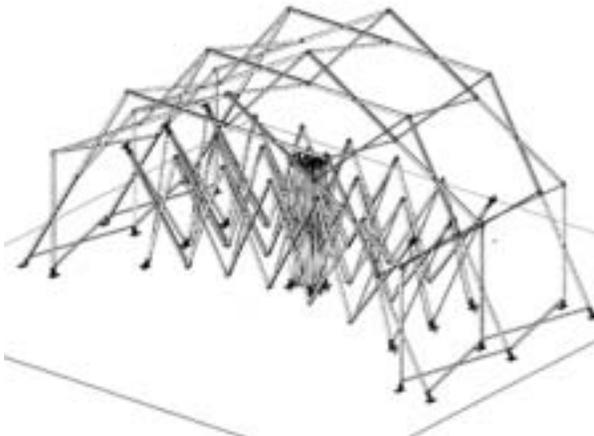
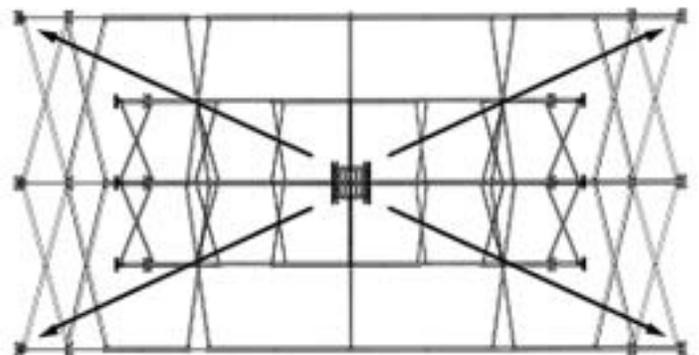


FIGURA 29
La estructura se despliega desde un eje central, siguiendo las diagonales



operario que mantenga en posición la zona central del arco. El efecto de desplazamiento del centro de la estructura va a ser más pronunciado durante el proceso de despliegue sin grúa, pues durante ese lapso la zona central del paquete tiene más libertad de movimiento.

El método con grúa es rápido y requiere poco trabajo físico, pero los costos de alquiler de la grúa y la dificultad de acceso de ésta a algunos lugares nos orientó a trabajar en el desarrollo de procesos de montaje y desmontaje no dependientes de la ayuda mecánica. En primer lugar se añadieron ruedas a la estructura para reducir el roce con la superficie de despliegue (fig. 30), las cuales permiten además desplazar el paquete verticalmente desde el vehículo de transporte hasta el lugar donde se efectuará el despliegue. El diseño del patín original se simplifica a una sola rueda con giro en el plano horizontal, que con el diámetro adecuado se mantiene apoyada durante todo el despliegue (fig. 31).

La primera etapa del despliegue manual es similar al caso con grúa y común para todos los sistemas ensayados. La estructura se expande horizontalmente al halar manualmente en sentido diagonal los cuatro extremos hasta el punto de transición donde comienza a elevarse (punto crítico) (fig. 32). En esta etapa no se presentaron mayores problemas; en caso de superficies muy desiguales o blandas, unas ruedas de mayor diámetro infladas podrían mejorar el movimiento. En el primer sistema

FIGURA 30
La adición de ruedas permite el transporte manual del paquete



FIGURA 31
Ruedas ESTRAN 1 V2

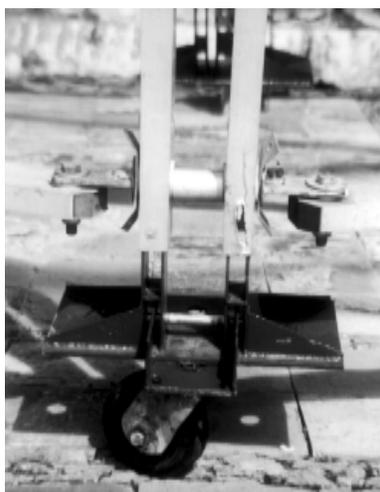


FIGURA 32
Despliegue manual

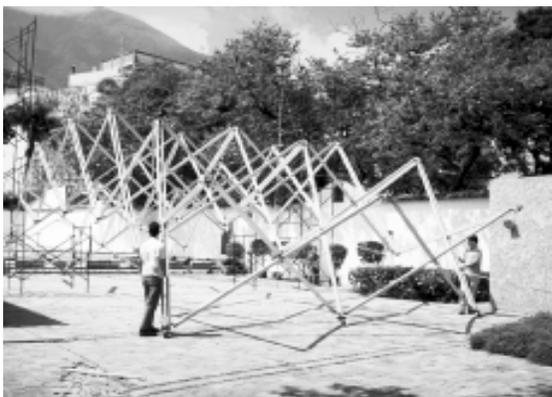
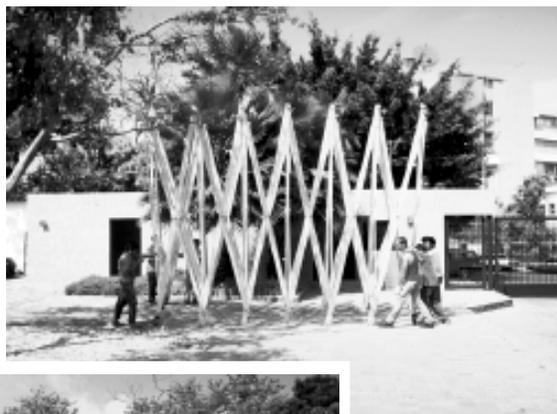


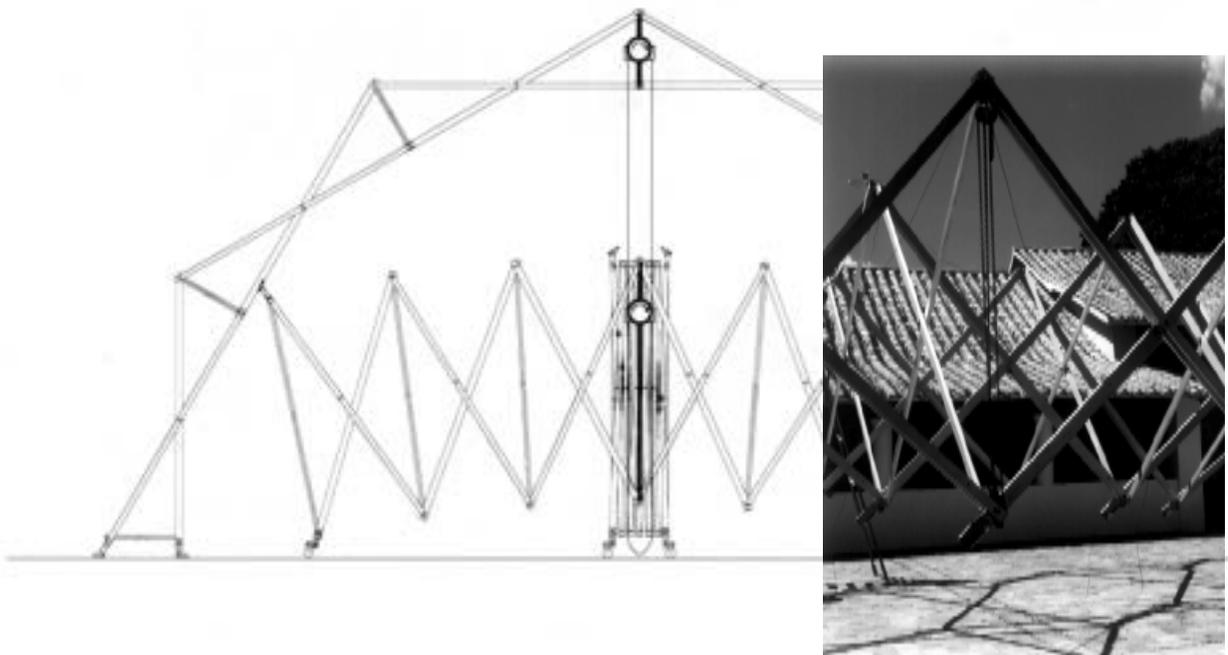
FIGURA 33
Pieza de conexión del polipasto



ensayado se coloca en este momento dos polipastos de 500 kg de capacidad en las tijeras centrales de los dos arcos exteriores a donde se tiene fácil acceso (fig. 33). Con la cadena totalmente liberada, el polipasto se conecta al nodo superior y al nodo inferior sobre platinas colocadas para este fin. La cadena se comienza a recoger, produciéndose una fuerza que tiende a reducir la distancia entre los nodos, cerrando las tijeras y haciendo que la estructura se levante (fig. 34).

Para reducir la tensión sobre los perfiles centrales se puede ayudar el despliegue empujando los cuatro perfiles de apoyo de las esquinas hacia el centro. El despliegue se continúa hasta que los topes de la estructura lleguen a su posición. Los polipastos pueden dejarse colocados en la estructura y utilizarse para el repliegue, que se realiza siguiendo los mismos pasos en forma inversa. Existe otro método de repliegue de la estructura, ensayado con buenos resultados, que consiste en conectar los extremos inferiores de dos de los arcos entre sí 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 haga bajar hasta que el arco desaparezca.

FIGURA 34
Despliegue manual usando polipastos en el eje central, arcos exteriores



Entonces se procede a plegar el paquete empujando diagonalmente hacia el centro los extremos de la estructura (fig. 35).

El segundo método ensayado consiste en que una vez alcanzado el punto crítico, se levanta la estructura halando verticalmente hacia arriba el nodo inferior del arco central, el cual se encuentra en el eje de despliegue de la estructura. Para realizar esta operación se montó una torre de andamios de 8 m de altura, en cuyo tope se colocó un polipasto con el cual se produce la fuerza para levantar la estructura. Al desplazarse el nodo verticalmente se cierran las cuatro tijeras que confluyen en el eje, las cuales a su vez movilizan el siguiente grupo de tijeras y así sucesivamente hasta que la estructura se levanta (fig. 36).

En teoría y en los modelos, estos métodos funcionan muy bien; pero el roce que se produce entre las ruedas y el piso, especialmente en los casos en que la superficie no es homogénea, hace que las fuerzas que es necesario generar sobre las tijeras que se encuentran alrededor de los puntos de empuje (polipastos) sean mayores que aquellas producidas cuando el despliegue se produce con la estructura separada del piso, o por las cargas de viento o lluvia cuando la estructura está desplegada. Esto trajo como consecuencia la ruptura de los perfiles de 75 x 32 mm en su punto más débil, es decir, en el punto de pivote donde es atravesado por el pasador (fig. 37).

Es importante notar que durante los procesos de despliegue, la estructura atraviesa configuraciones geométricas desfavorables en las cuales sus elementos se ven sometidos mayormente a esfuerzos de flexión; en nuestro caso, el punto crítico en el cual hay la transición entre el despliegue horizontal y el vertical, cuando la luz alcanza su mayor grado y la altura o abertura de las tijeras el menor. Es aquí cuando pueden fallar los perfiles (por aplastamiento por la presión del eje o por corte en la sección reducida por el hueco del eje), incluso estando diseñados para resistir bien los esfuerzos con la estructura desplegada y arriostrada. Por otro lado, el método de despliegue influye en la ubicación y magnitud de los esfuerzos sobre los componentes de la malla estructural. Por esto es necesario el diseño y cálculo de la estructura para las condiciones de despliegue. Se está comenzando un trabajo de simular en computadora los procesos de despliegue con el fin de determinar los puntos críticos y la magnitud de las cargas sobre los componentes para definir el método de despliegue más conveniente y modificar los componentes para hacerlos resistentes a los requerimientos estructurales del método escogido.

FIGURA 35
Ubicación de las poleas para el plegado de la estructura

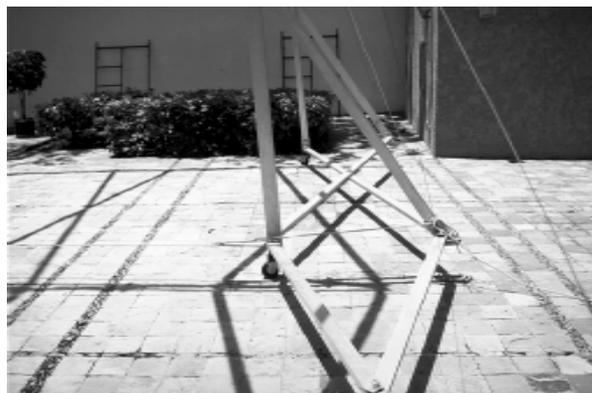


FIGURA 36
Levantamiento de la estructura con el uso de andamios

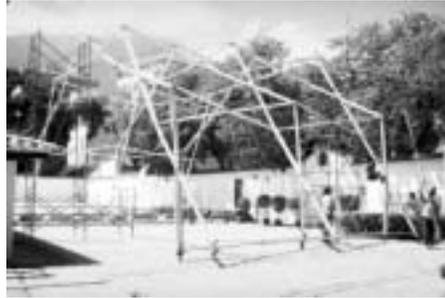


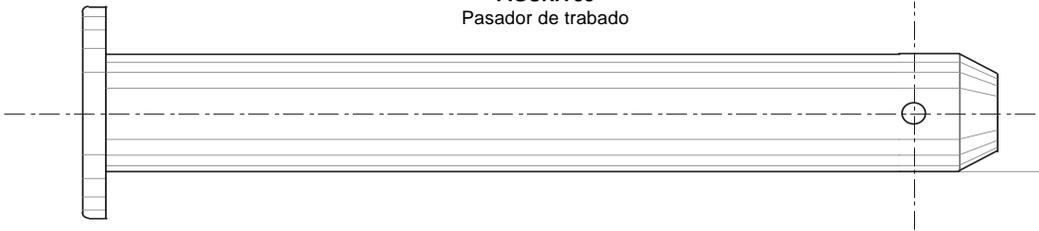
FIGURA 37
Fractura de los perfiles



Una vez que la estructura ha sido desplegada, se colocan los elementos de trabado que evitan que la estructura se repliegue y a la vez mejoran su comportamiento estructural. En la versión 1 del ESTRAN se colocó un pasador de aluminio en cada tope; este pasador traba el perfil tubular central con los dos laterales, evitando que los perfiles puedan rotar alrededor del nodo. Sin embargo este sistema suscitó problemas, ya que la estructura es muy flexible y se produjeron deformaciones que desalinearon los

agujeros del pasador haciendo difícil su colocación y posterior retiro (fig. 38). En la versión 2 del ESTRAN 1 y en el ESTRAN 1.1 se eliminan los pasadores en los arcos exteriores y se sustituyen por perfiles que conectan el nodo superior con el inferior en cada tijera. Esto evita que los nodos se separen y la estructura se repliegue, y a la vez reduce la flexión sobre los componentes del arco, acercando el comportamiento de éste al de una cercha cuyos componentes sólo trabajan a tracción o compresión (fig. 39).

FIGURA 38
Pasador de trabado



Estos perfiles se fijan sobre la rosca del conector en las versiones del ESTRAN 1. En el 1.1 se fija sobre la aleta del conector, la cual es suficientemente larga para aceptar el perfil y otra tuerca, utilizando un pasador para ello (fig. 40). En el arco central se sigue utilizando el pasador, ya que hay poco espacio para colocar estos perfiles adicionales, pero aumentando la tolerancia de sus perforaciones y las perforaciones de los perfiles dobles, que se hicieron ovaladas; también se absorbieron los desplazamientos axiales, los más difíciles de ajustar.

Los extremos sobre los que se apoya la estructura también se bloquean entre sí. En la primera versión del ESTRAN 1, esto se produce al colocar el perfil U de acero que sirve de apoyo y que conecta ambos extremos de la tijera; en la versión 2 y en el 1.1, donde los extremos de la tijera tienen las bases incorporadas, hay un perfil que conecta ambos extremos y se fija mediante pasadores (fig. 41).

Por ser una estructura muy liviana, en áreas despejadas donde se espere tener vientos superiores a 40 km/h es conveniente que la estructura se fije al suelo. Esto se realiza utilizando las perforaciones que existen en las planchas de las bases y mediante ramplús, en el caso de pavimentos que lo permitan, y con barras de Ø 25 mm en caso de tratarse de terreno. De no poder afectarse la superficie del pavimento o en terrenos arenosos, se utilizan bolsas llenas de arena que se colocan en el perfil que une las bases (fig. 42).

FIGURA 41

Elementos de los bloques de las bases en las diferentes versiones ESTRAN 1 V2



ESTRAN 1

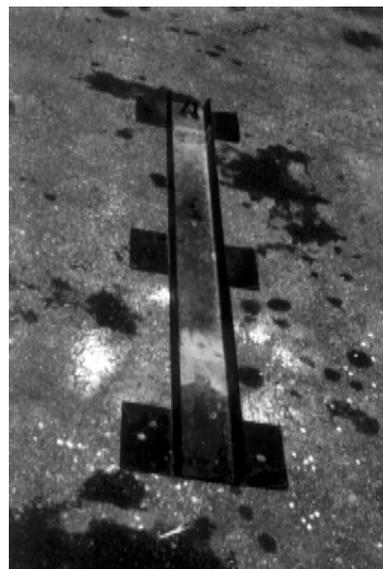
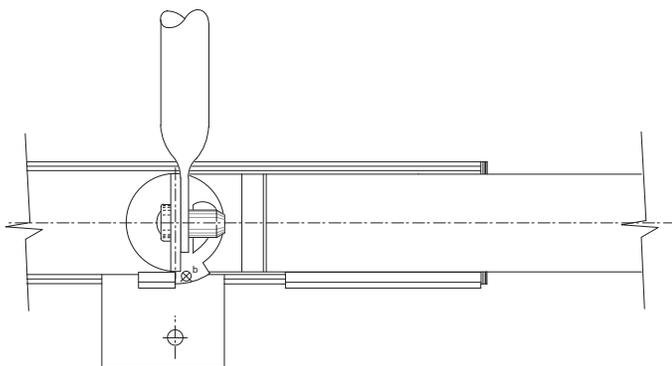
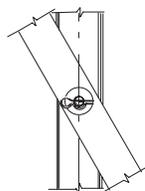


FIGURA 40

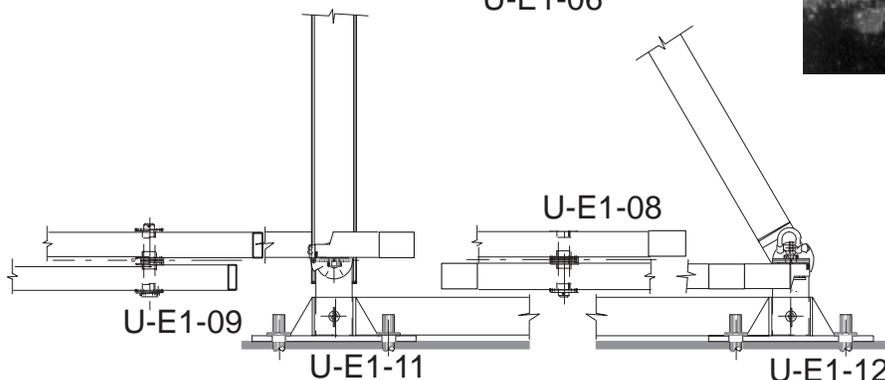
Conexión de las barras de refuerzo



ESTRAN 1.1



U-E1-06



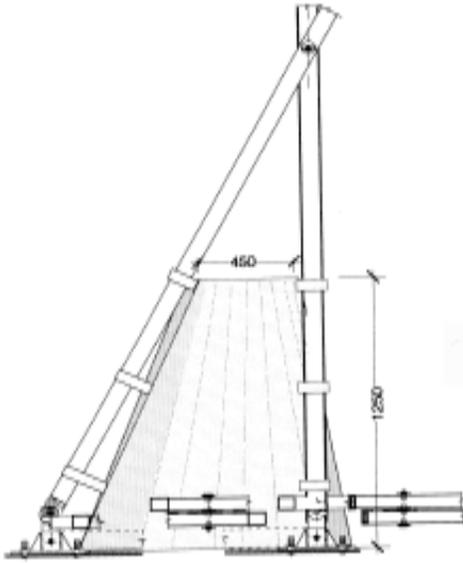
U-E1-09

U-E1-11

U-E1-08

U-E1-12

FIGURA 42
Modo alternativo de fijación



CUBIERTA Y SU MONTAJE

La cubierta fue elaborada con tela de poliéster recubierta de PVC con un peso de 400 g/m². Se escogió este material de cubierta por su poco peso, bajo costo y gran resistencia. Su duración entre las membranas estructurales es media (10-15 años) (Astro Research Corporation, 1979), lo cual no es problema en el caso de una estructura itinerante como el ESTRAN, donde su sustitución es muy sencilla. El patrón de la cubierta es un rectángulo plano de 8 m x 22 m (fig. 43) que se produce a partir de tiras de 2,5 m de ancho que se van sumando. La junta se produce solapando el material 4 cm y soldándolo por calor, aprovechando la capacidad de fusión del material termoplástico que recubre el exterior de la tela (en este caso

FIGURA 43
Patrón de la cubierta del ESTRAN 1V1

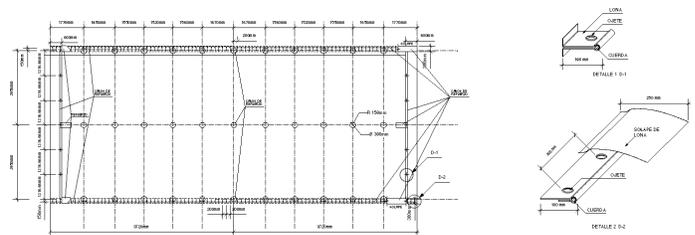


TABLA 2.1
Telas más usadas en Arquitectura textil.[1]

Material	Costo aprox. (Bs./m ²)	Deformación (%)	Durabilidad (años)	Transparencia (%)	Resistencia al fuego
Lámina de P.V.C.	1.008	>400	<10	90	No resiste
Lámina de poliéster	3.360	>400	10 - 15	95	No resiste
Lámina de F.E.P.	6.720	>200	>25	95	Resistente a la llama
Tejido de poliéster protegido con P.V.C.	de 1.680 a 5.040	16	10 - 15	8 - 30	Resistente a la llama con aditivos especiales
Tejido de nylon protegido con P.V.C.	de 1.680 a 5.040	20	10 - 15	0 - 30	Resistente a la llama con aditivos especiales
Tejido de poliéster protegido con hyalón	de 5.712 a 16.800	16	15 - 20	0 - 25	No resiste
Tejido de poliéster con P.V.F. y protegido con P.V.C.	de 2.352 a 6.048	16	15 - 20	7 - 20	Resistente a la llama con aditivos especiales
Tejido de fibra de vidrio protegido con P.T.P.E.	de 20.160 a 33.600	6	>25	5 - 15	Incombustible
Tejido de fibra de vidrio protegido con silicona	16.800	6	20 - 25	20 - 50	Resistente a la llama con aditivos especiales

el PVC). Esta junta es muy resistente, impermeable y de fácil ejecución utilizando un cau- tín caliente o fundiendo el PVC con alta fre- cuencia. El borde de la cubierta está reforzado con un cabo de poliéster y en los bordes late- rales que siguen la curvatura de la estructura se colocaron ojetes y un solape del mismo ma- terial, que permite la conexión de componen- tes adicionales a la cubierta para producir ce- rramientos laterales o para la conexión con otros módulos (fig. 45). Cerca de los extremos de la cubierta se colocaron dos bandas refor- zadas que van a servir como puntos de apoyo para tensarla. En el caso del ESTRAN 1.1, al tener la estructura doble curvatura la cubierta ya no tiene un patrón plano, lo que lo hace ligeramen- te más difícil de producir. Esta cubierta tie- ne un elemento adicional, que es la posibilidad de abrir los laterales para permitir salidas o conexiones con otros módulos (fig. 46).

La cubierta se suspende de la parte inferior de la estructura a través de 33 torni- llos con anillos, los cuales se sujetan a la mem- brana por presión entre dos discos, que a la vez sellan la junta (fig. 47). La membrana está reforzada en los puntos de sujeción, y los anillos metálicos separa- dos de ésta por anillos de poliestireno para protegerla de posibles desgarres. Este sistema de colgado ha sido lo

FIGURA 44
Cubierta ESTRAN 1 V1

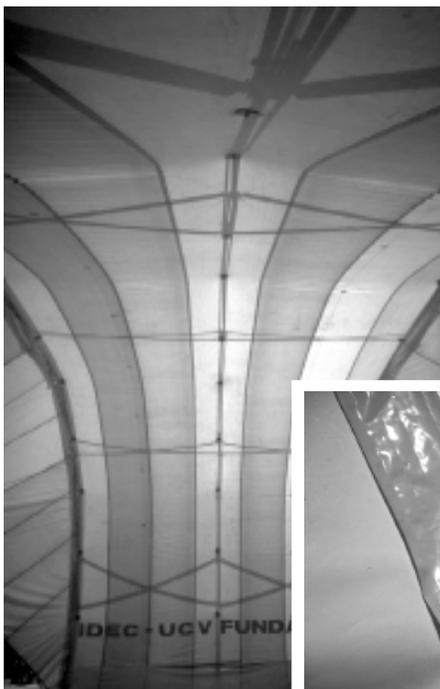


FIGURA 45
Solape y conexión lateral

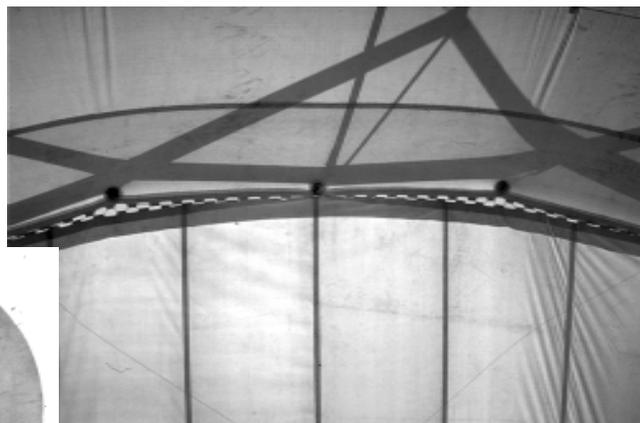


FIGURA 46
Patrón de cubierta ESTRAN 1.1

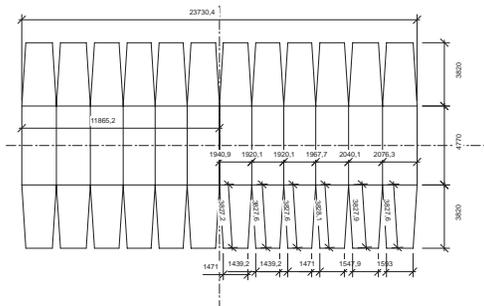


FIGURA 47
Piezas de colgado



FIGURA 48
Colgado de la cubierta



FIGURA 49
Elevación de la cubierta



suficientemente flexible para adaptarse a los diferentes sistemas de montaje que se ensayaron con la estructura.

Inicialmente la cubierta se ideó para ser colocada en la parte superior de la estructura, de manera que la cubierta estuviera permanentemente conectada a ésta, aun en la etapa de «paquete plegado compacto», pero debido a que los perfiles utilizados en la construcción de la estructura son rectangulares, éstos rasgaban el material de la cubierta que tiende a quedar atrapado entre los perfiles. Este problema podría solventarse utilizando perfiles de sección circular en vez de rectangular o la eliminación de las aristas de los tubos rectangulares, como se hace posteriormente en el ESTRAN 1.1. Sin embargo, al cabo de este trabajo no se ha construido una estructura que permita la cubierta en su cara exterior.

Otro de los elementos de estudio de este trabajo fue el proceso de montaje de la cubierta. El primer sistema que se utilizó para colgar la cubierta bajo la estructura fue el siguiente: se despliega la estructura hasta el punto donde comienza a levantarse del suelo, en este momento se extiende la cubierta bajo ella y se cuelga directamente sobre la estructura en los soportes que ésta tiene para tal fin (fig. 48). Se procede a continuar con el proceso de despliegue, en el cual la estructura se levanta llevando con ella la cubierta (fig. 49). A pesar de que este método es bastante fácil y rápido, la cubierta interfiere en las operaciones de bloqueo de la estructura y para los propios ajustes de tensado de la cubierta; además, los operarios no pueden realizar estas operaciones desde abajo utilizando un andamio móvil y tiene que recurrirse a escalar la estructura y trabajar desde arriba, lo que ha resultado ser difícil y lento. Por otro lado, el desplegar la estructura con la cubierta implica 100 kg más de peso que en el proceso con grúa; aparentemente no se trata de un incremento muy apreciable, pero cuando la operación se realiza manualmente sí lo es.

Como proceso alternativo se ensayó levantar la cubierta una vez que la estructura ha sido totalmente desplegada y estabilizada, utilizando para este fin un sistema de poleas (fig. 50), que son colgadas de la estructura antes del despliegue total. Este sistema, que permite elevar la cubierta desde abajo (fig. 51), se eleva en dos partes, primero utilizando como apoyo el arco central y uno lateral, lo cual posibilita el acceso a la zona central de la cubierta para su ajuste. Una vez realizado esto se levanta el tercer arco y se completa el ajuste desde el exterior de la estructura (fig. 52).

En este método, la estructura puede quedar colgada a los cabos que se utilizan para su elevación. Esto resulta práctico cuando la estructura va a estar en uso por períodos cortos de tiempo, ya que con sólo soltar los extremos de los cabos desde abajo, es posible bajar la cubierta en un tiempo muy breve. Cuando el tiempo de permanencia es largo, más de un par de semanas, resulta conveniente sustituir los cabos por cadenas, que son menos propensas a deteriorarse por la radiación UV y el ambiente. Por otro lado, éstas permiten ajustar la tensión moviendo los ganchos a diferentes eslabones.

FIGURA 50
Polea de levantamiento



FIGURA 51
Polea de levantamiento

Secuencia del montaje de la cubierta

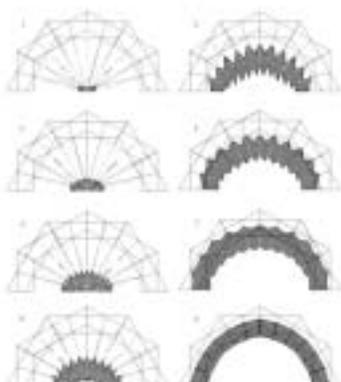


FIGURA 52
Montaje cubierta

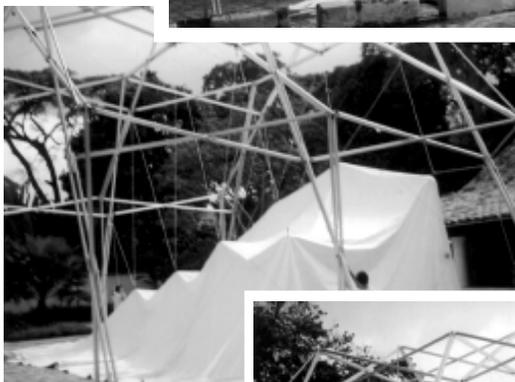
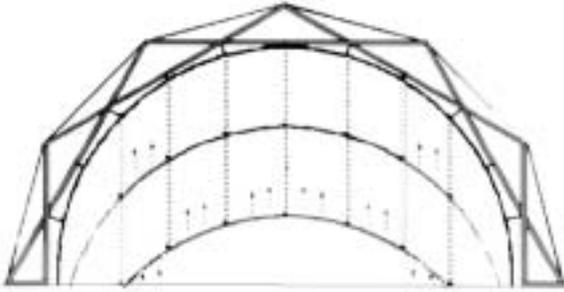


FIGURA 53
Cubierta metálica



Para los casos donde la permanencia de la estructura va a ser prolongada, se propuso una cubierta de lámina metálica corrugada y perfiles tubulares que se cuelga de la estructura; las láminas se van ensamblando sobre el piso y se van izando para permitir la colocación de las franjas laterales (fig. 53).

COMBINACIONES

Usando la misma geometría se pueden diseñar y construir estructuras de mayores diámetros para adaptarse a los requerimientos de área o de luces. Después de los primeros ensayos que mostraron que estructuras más grandes con perfiles de dimensión mayor de 4,20 m resultaban ser difíciles de manejar manualmente, se pensó que una unidad básica que pudiera combinarse para crear áreas cubiertas mayores era más práctica y más adaptable a diferentes situaciones que una unidad de mayor área cubierta, la cual por otro lado había que construir especialmente para ese uso.

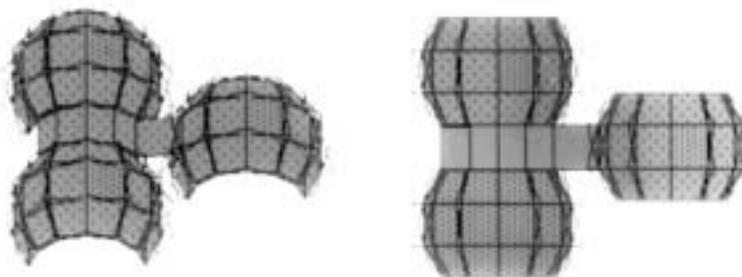
El ESTRAN 1 permite la conexión con otras unidades similares a través de los extremos de la bóveda (fig. 54), permitiendo combinaciones en forma lineal, al unir los módulos con una franja de la membrana de cubierta que se tensa entre las cubiertas de los módulos que se desea conectar. Para ello se utiliza la franja de conexión que posee la cubierta principal. Otra posibilidad es la de combinar tres módulos de forma radial (fig. 55); esto se realiza de forma similar al caso anterior con elemento de cubierta que se tensa entre los módulos creando un espacio central que sirve de espacio de transición sobre el que giran los tres módulos.

Otra posibilidad es combinar dos grupos de módulos lateralmente. En las primeras versiones esta conexión sólo es posible a través del conector central; en la versión 1.1 se realiza directamente a través de los módulos, ya que la estructura de cuatro arcos permite el paso lateral (fig. 56).

FIGURA 54
Combinación lineal

FIGURA 55
Combinación radial

FIGURA 56
Combinación lateral



ESTRAN 1.1

El ESTRAN 1.1, como ya se mencionó anteriormente, se diseñó como producto comercial que pueda satisfacer los requisitos de mercados más exigentes, como el europeo (resistencia a vientos de hasta 100 kilómetros por hora y 30 kilogramos de nieve por m²). La estructura está formada por dos arcos altos de 16 m de diámetro interno y dos arcos externos bajos de 12,18 m de diámetro interno, todos paralelos y unidos entre sí por 28 brazos perpendiculares colocados en los planos radiales generados por el eje de rotación del cilindro y los nodos en los arcos, cada uno de los cuales se compone de seis ensamblajes tipo tijera. Al desplegarse, la estructura cubre un área de 186 m² y plegada conforma un paquete compacto de 4,9 x 1,40 x 0,80 m (volumen 5,488 m³, peso 900 kilogramos) (fig. 57).

En este modelo se aplican las mejoras generadas con la manipulación del ESTRAN 1, pero la mayor diferencia se encuentra en la geometría de esta retícula espacial, donde la bóveda original se curva en sentido perpendicular, tomando una forma de concha de tortuga (fig. 58). Esta geometría le da más capacidad a la estructura para resistir las cargas a las que va a ser sometida, sin necesidad de incrementos importantes en el peso de los perfiles. Además, aparecen terminales y piezas de remate en los extremos de los perfiles (fig. 59), que a su vez permi-

FIGURA 58
ESTRAN 1.1

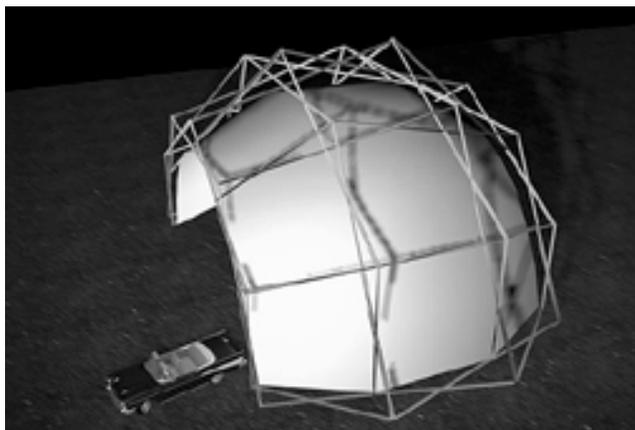


FIGURA 59
Terminales

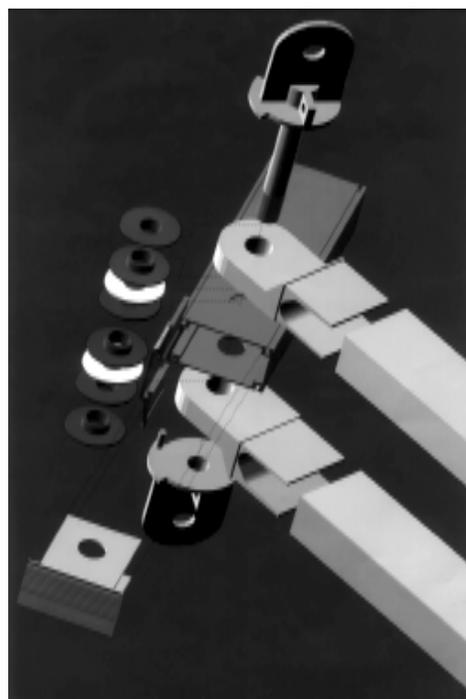


FIGURA 57
Dimensiones ESTRAN 1.1

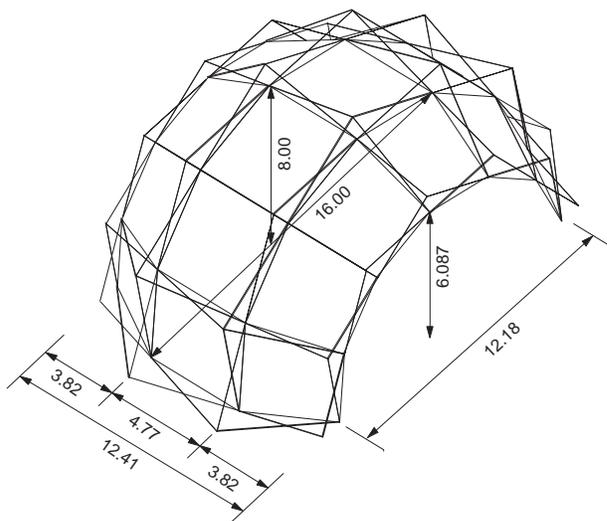
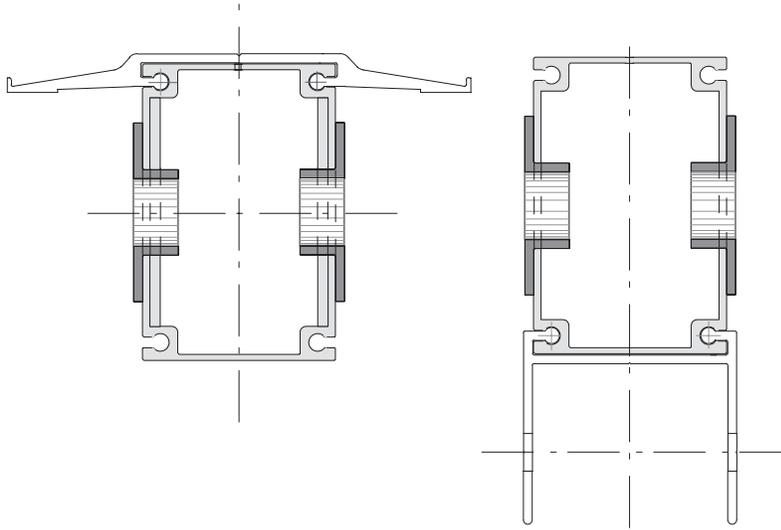


FIGURA 60
Fijación de componentes adicionales



ESTRAN 1



ten la incorporación en forma sencilla de los componentes adicionales, como topes y piezas para el colgado de la cubierta (fig. 60).

CONCLUSIONES

Con este prototipo se demostró la factibilidad de producir estructuras casi instantáneamente a partir de paquetes compactos de fácil manejo, transporte y almacenamiento.

Permitió igualmente estudiar el comportamiento de los materiales escogidos, como el aluminio, la combinación de éste con elementos de hierro galvanizado, los materiales aislantes de las bocinas, como el poliuretano rígido, el poliestireno y el nylon, estableciendo su durabilidad tanto al uso como al medio ambiente.

El comportamiento de la estructura ha sido muy satisfactorio; el deterioro en sus partes móviles se redujo al sustituir las bocinas de poliuretano y las arandelas de poliéster por bocinas de nylon.

El tamaño y el peso de esta estructura la hacen de fácil manejo y creemos que se pueden desplegar, de un solo paquete, estructuras con el doble del área del prototipo ensayado. Para áreas mayores será necesario construir las cubiertas a partir de varios paquetes o la utilización de equipos más pesados. Una limitación adicional en el tamaño del paquete o de la estructura que puede ser desplegada de un solo paquete, es la capacidad de transporte. Durante el proceso de apertura la estructura tiene tendencia a deformarse, por lo que los operarios deben tener cuidado de mantenerla alineada. Esto se debe a que no presenta elementos rígidos que triangulen los marcos que conforman la bóveda, pero una vez que llega a su configuración abierta, los tensores le dan estabilidad y rigidez.

Las estructuras transformables vienen a conformar una nueva línea de construcción que abre fronteras a la arquitectura, mostrando en forma sencilla una nueva posibilidad móvil y transformable, permitiendo además su fácil manipulación y diseño con gran eficiencia estructural, dando un importante impulso al desarrollo de esta tecnología.

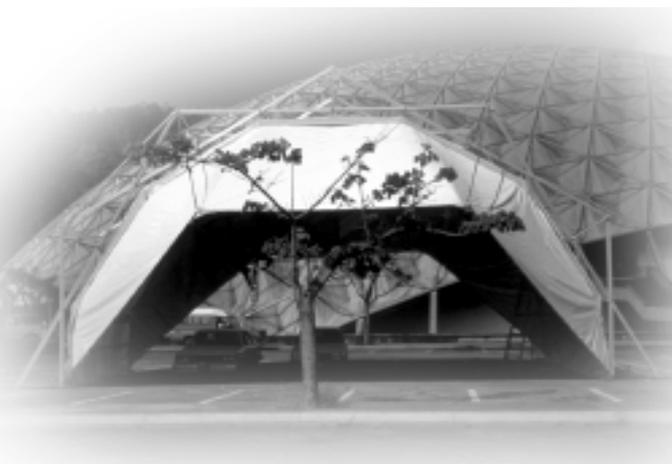
El comportamiento de estas estructuras ha sido muy satisfactorio hasta la fecha; sin embargo, quedan aspectos por estudiar y profundizar. Nuevos ejemplos de estructuras transformables han aparecido en el mundo, aportando más información sobre los procesos de fabricación y montaje, y con el tiempo nos proporcionarán mayor información referida al comportamiento y durabilidad sobre estructuras expuestas que se manipulan permanentemente.

Entre los aspectos importantes que deben ser tomados en cuenta para el diseño de las estructuras transformables se encuentran: el tipo de aplicación, el tiempo y frecuencia de uso y el método a ser utilizado para el despliegue.

La aplicación no es el único factor que definirá el tipo de estructura a ser utilizada, también cuentan las condicionantes derivadas de otros aspectos que deben ser tomados en consideración para el diseño: el área a cubrir, la luz a superar, las posibilidades de apoyo, transportabilidad, frecuencia de uso, condiciones ambientales, cargas a la que va a ser sometida, etc. Son factores que van a tener un gran peso en la escogencia de la solución, materiales y métodos de transformabilidad. Por ejemplo, una estructura que requiere ser transportada deberá ser liviana para facilitar su manejo, en cuyo caso el aluminio como material estructural sería la elección adecuada; en cambio, una estructura que se repliega hacia un extremo de un espacio a cubrir podría diseñarse con perfiles de acero.

El tiempo de permanencia de la estructura desplegada y la frecuencia del proceso de transformación establecen determinantes importantes para el diseño de la misma y la elección de los materiales. Podemos tener desde aplicaciones que requieran de estructuras con utilización muy frecuente y tiempos de permanencia corta, hasta estructuras que se montan una sola vez. Una estructura que se monta y desmonta con mucha frecuencia requiere de conexiones móviles más resistentes al desgaste, cubiertas adecuadas y métodos de transformabilidad más económicos que el de una estructura de poca frecuencia de uso, como por ejemplo un refugio de emergencias, cuyo uso es eventual (unas pocas veces al año). Existen estructuras cuya permanencia es corta o cuya aplicación exige una transformación muy rápida, como en el

ejemplo del refugio de emergencias, donde se requiere un método de transformación casi instantáneo. En el caso de una estructura cuya permanencia de uso es larga, por ejemplo un espacio de exposiciones itinerantes que permanece tres meses en cada localidad, puede muy bien ser rentable con un proceso de montaje de varios días y podrá aceptar la adición de componentes ensamblables y cubiertas más rígidas que no necesariamente se despliegan conjuntamente con la estructura. En el caso de estructuras que utilizan la transformabilidad como método constructivo (tomando en cuenta las ventajas implícitas de la construcción en taller, precisión, calidad e independencia de las condiciones climáticas), las conexiones móviles deben ser lo suficientemente económicas para que la estructura compita con una estructura ensamblable, donde el desgaste que se produzca por el movimiento durante la transformación es irrelevante.



Los métodos de transformabilidad son clave en el diseño y la durabilidad de las estructuras; en su sencillez reside la competitividad sobre las estructuras ensamblables. Cuando se diseña una estructura transformable, el método de transformabilidad debe ser tomado en cuenta, ya que el mismo supone importantes requerimientos 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 cargas de viento cuando la estructura se encuentra en configuración abierta. Por otra parte, durante las diferentes etapas de la transformación la estructura adopta configuraciones geométricas que no permiten asimilar adecuadamente las cargas, lo que hace que en estas situaciones la estructura sea muy susceptible a sufrir daños. En consecuencia, estos procesos deben ser estudiados en mayor detalle.

Otro elemento importante y que requiere mayor estudio es el caso de las cubiertas, las cuales constituyen un elemento clave para el fin utilitario del conjunto. La cubierta puede formar parte del paquete inicial de la estructura o adicionarse posteriormente.

Estas estructuras permitieron realizar el estudio de los procedimientos de montaje de las cubiertas y algunos detalles para la confección de las mismas, logrando resultados satisfactorios. Sin embargo, conside-

ramos que la geometría de los patrones de la cubierta requiere de un mayor desarrollo para evitar «arrugas» y secciones poco tensionadas que ponen en peligro la durabilidad de la cubierta frente a la acción del viento o lluvias fuertes. Igualmente se detecta la carencia de otros ejemplos prácticos de cubiertas formadas por elementos rígidos que puedan incorporarse y plegarse junto a la estructura, de los que solamente existen hasta el momento algunos estudios teóricos.

En el caso del ESTRAN 1, nos encontramos en etapa de estudio del comportamiento estructural de los componentes durante los procesos de transformación. Se están revisando métodos económicos de producir la transformabilidad sin necesidad de utilizar una grúa, igualmente la manera de mejorar la cubierta, patrones, material, métodos de tensado, etc., y se están construyendo elementos de refuerzo y remate para aumentar la resistencia a la manipulación.

Estas estructuras han sido fundamentales para explorar su factibilidad de aplicación y mercadeo, detectándose buena acogida en el mercado de eventos temporales y de mucho interés por parte de la industria petrolera.

BIBLIOGRAFÍA

AFAPL TR 68-17 (1967). "Transactions". *Third Aerospace Expandable and Modular Structures Conference*. Sponsored by Air Force Aeropropulsion Laboratory (Space Technology Branch), Wright Paterson Air Force Base, Dayton Ohio. Florida.

ASTRO Research Corporation (1979). *Information Catalogue*.

BINI, D.N. & BINI, N.G. (1996). "The Tower City concept - shelf-shaping megastructure for a city infrastructure to be build by mobile, robotized factories". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 327-336).

BUILDING SYSTEM DESIGN GROUP (1985). "Design and Development of Building System for and Exhibition Space". Report MIT.

BUILDING SYSTEM DESIGN GROUP (1986). "Space Station Workshop". Report MIT.

BURGOYNE, C.J. & CHAN, W.H. (1991). "Active control of Bridge Structures". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 199-211.

BRESH, M.A. (1984). "Combining space frame and fabric structures". *Third Conference of Space Structures*. New York: Elsevier Applied Science Publishers.

- BRUNNER, A. (Jan, 9, 1968). "Expansible Surface Structure". United States Patent 3362118.
- CLARKE, R.C. (1984). "The kinematic of a novel deployable space structure system". *Third Conference of Space Structures*. New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- CLEVETT, M.L. (1985). "Portable Bridge Design comes down to earth". ENR.
- CREE (1988). "Stores Et Toiles". *Architecture Intérieure*, juin/juillet.
- DENT, R. N. (1971). *Principles of pneumatic architecture*. London: The Architectural Press.
- DORNIER SYSTEMS. "Extendable and retractable mast". *Information Catalogue*.
- ESCRIG, F. (1984). "Expandable space frame structures". *Third Conference of Space Structures* (pp. 845-850). New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- ESCRIG, F. (1996). "General survey of deployability in architecture". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 3-21).
- ESCRIG, F. & Valcárcel, J.P. (1991). "To cover a swimming pool with an expandable structure". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Topics in Engineering* (pp. 273-282).
- ENGLE, W. H. (March 24, 1970). "Modular Structure". United States Patent 3501876.
- FULLER, R.B. (1983). *Inventions*. New York: St. Martin's Press.
- GABRIEL, J. F. (1984). "A space-frame building system for housing". *Third Conference of Space Structures* (pp. 1052-1057). New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- GANTES, C.; CONNOR, J.J. & LOGCHER, R.D. (1991). "Geometric and structural design consideration for deployable space frames". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 249-260.
- GANTES, C. (1996). "Analytical prediction of the snap-Through characteristics of deployable structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 83-92).
- GLAESER, L. (1972). *The work of Frei Otto*. New York: The Museum of Modern Art.
- HABER, R. B.; TUNER, LI. et al. (1986). "Air-supported forming". *Concrete International*, pp.13-69.
- HEDGEPEETH, J.M. & ADAMS, L.R. (1983). "Design concepts for large Reflector Antenna Structures". NASA contractor report 3663.
- HERNÁNDEZ, C.H. (1987). "Deployable Structures". Tesis, MIT, Cambridge.
- HERNÁNDEZ, C.H. (1988). "Estructuras Transformables Estran 1". *Tecnología de la Construcción*, N° 4.
- HERNÁNDEZ, C.H. & ESCRIG, F. (1994). "Una estructura desplegable en aluminio. El Pabellón de Venezuela en la Expo'92". *Informes de la Construcción*, N° 429, pp. 61-69.
- HERNÁNDEZ, C.H., in collaboration with W. Zalewski (1991). "Deployable structures". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 237-248.
- HERNÁNDEZ, C.H. (1996). "New ideas on deployable structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 63-72).
- HOBERMAN, C. (1992). "Art and science of folding structures". *Sites*, Vol. 24, pp. 34-53.
- HUG, B.; SEDLACEK, G. & NEUENHAUS, D. (1991). "Simulation of the effects of possible local failures during the erection of foldable bridges". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 65-78.
- INSTITUTO DE DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela (1993). *Pabellón de Venezuela Expo '92. Sevilla*. Caracas: IDEC-FAU-UCV.
- KAWAGUCHI, K.; NABANA, K. & HANGAI, Y. (1996). "Consideration for folding analysis of frame structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 383-394).
- KWAN, A.S.K. & PELLEGRINO, S. (1991). "The Pantographic Deployable Mast: design, structural performance, and deployment tests". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 213-224.
- LORENS, J. & SOLDEVILA, A. (1996). "New retractable roofs on existing buildings". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 135-144).
- MAJOWIECKI, M. (1996). "Conception design in the reliability of long-span lightweight structure systems: observation concerning retractable roofs". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 351-370).
- MARKS (1960). *Dymaxion World of Buckminster Fuller*. New York: Reinhold Publishers.
- MARTIKKA, H. (1996). "Simulation of demolition dynamics of mobile telescopic machines". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 315-325).
- MARTÍNEZ APEZTEGUÍA, J. & AZKUE ARRASTOA, J. L. (1996). "Retractable roof for a multi-purpose centre in San Sebastián". In F. Escrig

- & C.A. BREBBIA (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 371-382).
- MARTINEZ-CALZÓN, J. (1996). "Two special construction procedures for the erection of the big communication towers of Collserola and Valencia". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 337-348).
- METIONI, B. (1987). "Tomorrow's Manufacturing Facilities, Design of a Car Assembly Plant for the 21st century". Tesis, MIT, Cambridge.
- MIRMIRAN, A. & WOLDE-TINSAE, A.M. (1991). "Expandable, rapidly assembled sandwich domes". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 261-272.
- MIRMAN, C.R. (1996). "Structural design and analysis of movable, rapid-assembly performance staging". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 395-405).
- MOLLAERT, M. (1996). "Retractable membrane roofs". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 407-417).
- MONJO, C.J. & GAMES-GUARDIOLA, J.M. (1996). "A foldable roof with sailing technology". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 175-184).
- MOORE, A.B. (June 20, 1967). "United States Patent 3,325,958".
- MOTRO, R. & BOUNDERBALA, M. (1996). "Mobile tensegrity systems". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 103-111).
- NASA TECH BRIEF (1984). *Synchronously Deployable Truss*. Summer B84-10350/ NASA lar-13117 Langley Research Center.
- NASA TECH BRIEF (1986). *Synchronously Deployable Truss*. NASA lar-13490 Langley Research Center.
- NODSKOV (sept. 24, 1983). "International Patent WO84/01094".
- OTTO, F. (1982). *Natürliche Konstruktionen*. Stuttgart: Deutsche Verlags-anstalt.
- OTTO, F.(1979). *Tensile Structure*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- PÉREZ PIÑERO, E. (1968). "Structures Réticulées". *L'Architecture d'Aujourd'hui*, Vol. 141, pp. 76-81.
- PÉREZ PIÑERO, E. (1992). *Estructuras Desplegables*. Pabellón de Murcia. Sevilla.
- PÉREZ PIÑERO, E. & PÉREZ BELDA (1996). "Constructive problems in the deployable structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 23-34).
- PÉREZ, V.J. (1996). "Recent advances in the analysis of expandable structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 45-54).
- POPOVIC, O.; CHILTON, J.C. & CHOO, B.S. (1996). "Rapid construction of modular buildings using the Reciprocal Frame". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 73-82).
- RASKIN, I. & ROORDA, J. (1996). "Buckling force for deployable pantographic columns". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 305-314).
- RENNER, W. (1996). "Variable roofing-system for the step-by-step covering of the industrial waste deposit plant at Bielefeld-Herford". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 165-174).
- ROWLAND MAINSTONE (1983). *Developments in Structural Form*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- SALVATORI, M. (1963). *Structure in Architecture*. New Jersey: Prentice-Hall International.
- SÁNCHEZ, J.; MORALES, J. & ESCRIG, F. (1996). "Deployable X-frames tested in reduced scale model". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 55-62).
- SASTRE, R. (1996). "Expandable arches". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 123-131).
- SCHETKY, M. D. (1979). "Shape-Memory Alloys". *Scientific America*, Vol. 24, Nº 5, pp. 74-84.
- SCHULZE, J.H. et al. (sept. 19, 1961). "United States Patent 3,000,386".
- SIRCOVICH, S.O. (1984). "Self-Erecting Two Layer Steel Prefabricated Arch". *Third Conference of Space Structures* (pp. 823-827). New York: Elsevier Applied Science Publishers.
- TECHNICAL SUPPORT PACKAGE. *Explosive Welding For Remote Applications*. NASA lar-13119 Langley Research Center.
- TECHNICAL SUPPORT PACKAGE. *Synchronously Deployable Truss*. NASA lar-13117 Langley Research Center.
- TECHNICAL SUPPORT PACKAGE. *Deployable Geodesic Truss*. NASA lar-13113 Langley Research Center.
- TEXTOS DE ARQUITECTURA 1 (1993). *Arquitectura Transformable*. Sevilla: ETSAS.
- VALCÁRCCEL, J.P.; ESCRIG, F.; MARTÍN, E. & FREIRE, M. (1991). "Expandable Space Structure with Self-folding Textile Cover". *Topics in Engineering*, Vol. 8, pp. 283-295.

VERHEYEN, H.F. (1984). "Expandable Polyhedral Structures Based on Dipolygonios". *Third Conference of Space Structures*. New York: Elsevier Applied Science Publishers.

WEBB (1969). "United States Patent 3,486,279".

WESTBURY, P.S. (1996). "The development of the RSSB tent". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 185-188).

WESTBURY, P.S. (1996). "Dismountable buildings - a new design strategy". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 419-432).

WOLDE-TINSAE, A.M. (1991). "Expandable Long Span Enclosures". *Topics in Engineering*, Volume 8, pp. 225-235.

YOU, Z. & PELLEGRINO, S. (1996). "New solution for foldable roof structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 35-44).

ZEIGLER (may 31, 1977). "United States Patent 4,026,313".

ZUK, W. (1970). *Kinetic Architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

REFERENCIAS

[1] Monjo, C.J. (1990). Introducción a la arquitectura textil. Cubiertas colgadas. Madrid: Textos de Arquitectura, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

[2] Escrig, F. (1984). "Estructuras espaciales de barra desplegadas". *Informes de la Construcción*, Vol. 36, pp.365.

[3] Escrig, F. & Valcárcel, J.P. (1987). "Curved expandable grids". *Non-Conventional Structure Proceedings* (pp. 157-166). London.

[4] Sánchez-Cuenca, L. (1996). "Geometric models for expandable structures". In F. Escrig & C.A. Brebbia (eds.), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. MARAS 96* (pp. 93-102).