

# ESTRUCTURAS TRANSFORMABLES

## ESTRAN 1

### Estructura de barras transformable de configuración cuadrada



Carlos H. Hernández(\*)

(\*) Profesor-Investigador del IDEC-FAU-UCV.

#### INTRODUCCION

Hay muchos ejemplos de ideas (conceptos) de ensamblajes estructurales que poseen la capacidad de ser plegados, de tal manera que pueden ser desplegados cuando se desea y plegados nuevamente a una forma compacta para su almacenamiento y/o transporte. El ejemplo mas popular y conocido de tales sistemas plegables/ desplegados, es la estructura de una sombrilla ordinaria (fig.1) o los equipos para camping (fig.2).



FIG. 1 PARAGUAS

Todos estos ensamblajes estructurales con capacidad de transformación pueden agruparse en dos grandes grupos :

- A- Estructuras de barras
- B- Estructuras de superficie

Dentro del primer grupo se encuentran las estructuras con mecanismo de tijeras, las tensiles, las de mecanismos deslizantes, etc. Su característica común es la presencia de elementos lineales rígidos o barras que trabajan comúnmente como elementos de compresión, tensión, o flexión conectados por nodos o bisagras. Podemos mencionar como ejemplo de este grupo los paraguas. En la segunda categoría los esfuerzos son soportados por superficies continuas en algunos casos, como en las estructuras inflables o presurizadas, o por planos unidos por algún medio flexible que le da continuidad a la estructura. Entre ellas tenemos las estructuras neumáticas ó inflables, elaboradas normalmente con una membrana muy resistente y liviana que es estabilizada total ó parcialmente por una diferencia de presión entre el exterior y el interior. El ejemplo mas común es el globo, otras estructuras de este grupo están basadas en elementos tubulares que pueden penetrar uno dentro del otro formando un paquete compacto que es luego extendido y estabilizado, este es un concepto utilizado mucho en artefactos mecánicos, como mástiles y grúas; su aplicación en arquitectura esta poco desarrollada. Un ejemplo de este grupo mas estudiado en su aplicación para viviendas son las estructuras tipo acordeón.

Las estructuras transformables pueden ser utilizadas en una variedad de situaciones tales como:

a- Situaciones en las que se requiere de un espacio cerrado o protegido por periodos cortos de tiempo, y que luego deba trasladarse a otra localidad para almacenarlo ó erigirlo nuevamente. Ejemplos:

- Exposiciones móviles
- Ferias
- Infraestructura para Exposiciones en general
- Refugios provisionales
- Hospitales móviles

b- Lugares de difícil acceso o con falta de mano de obra. Ejemplos:

- Unidades remotas de retransmisión
- Mástiles de antenas
- Estaciones remotas, meteorológicas o de investigación

- Instalaciones Militares.
- Instalaciones de emergencia en localidades lejanas tales como puentes, refugios, hospitales, etc.

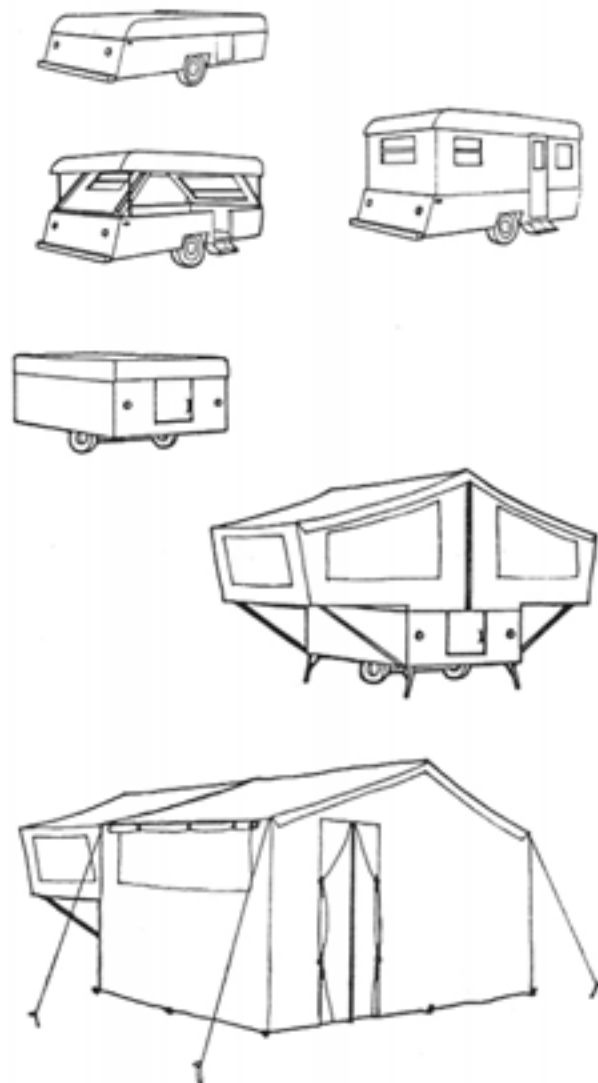


FIG.2 EQUIPOS PARA CAMPING

c- Equipos para aplicaciones especiales o cubiertas protectoras de equipos especiales que no pueden ser transportados totalmente ensamblados y requieren ser armados muy rápidamente. Ejemplos:

- Radares y antenas portátiles
- Hangares portátiles
- Puentes portátiles
- Protección y camuflaje de equipo militar

d- Protección de un espacio debido a condiciones climáticas variables. Ejemplos:

- Cubiertas para estadios
- Cubiertas para plazas

e- Condiciones de alto riesgo con elevado costo de mano de obra, ambientes hostiles, transporte costoso.

Ejemplos:

- Exploración terrestre
- Exploración Espacial
- Estaciones Espaciales

La exploración espacial ha sido una de las áreas en la cual la transformabilidad de las estructuras es de gran interés, muchos artefactos curiosos han sido desarrollados bajo los auspicios de NASA.

f- Como un auxiliar de construcción. Ejemplos:

- Encofrados reusables para formas complejas
- Plataformas de altura variable

g- Como método constructivo.

La visión tradicional de construcción ha sido la de una acreción simple. Una piedra se coloca sobre otra piedra, ladrillo sobre ladrillo, acero sobre acero y así sucesivamente hasta que la forma final aparece. En la construcción moderna la acreción se hace en grandes módulos en la forma de paredes, pisos o cuartos completos. Un nuevo método consiste en traer al sitio la estructura completa en forma compacta y desplegarla allí para su uso permanente.

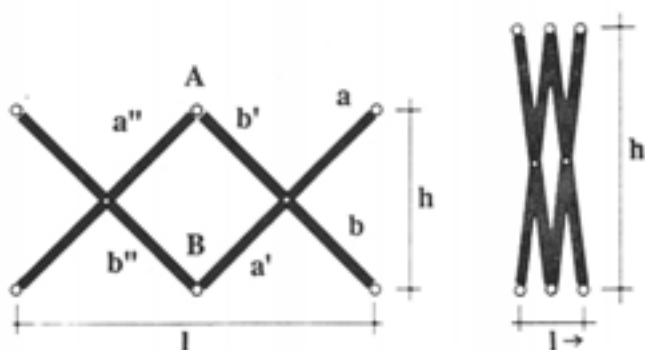


FIG.3

Las estructuras transformables son competitivas con otros sistemas de erección en situaciones donde la velocidad es esencial, la mano de obra muy costosa y escasa, ó, cuando se requiere erigir y re-erigir frecuentemente la misma estructura. Las estructuras transformables necesitan menos mano de obra, menos especializada, y la erección se realiza en una fracción del tiempo requerido en las estructuras convencionales.

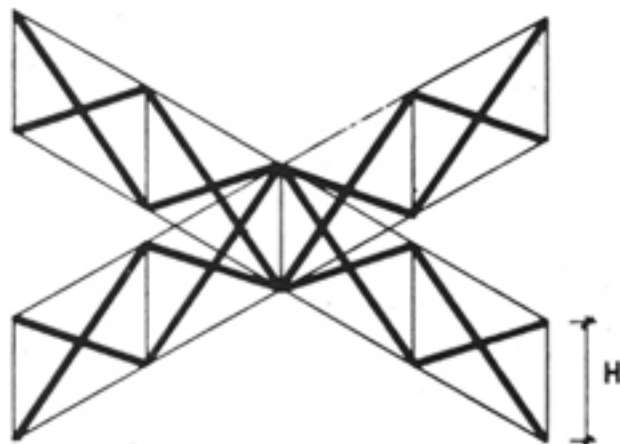


FIG.4

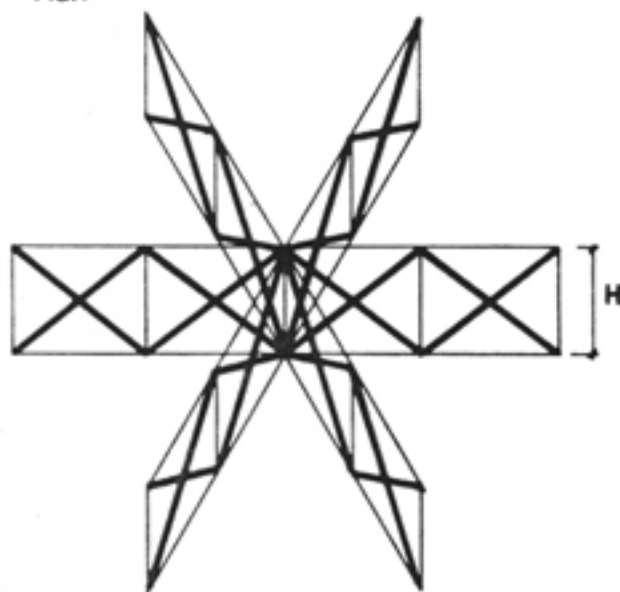


FIG.5

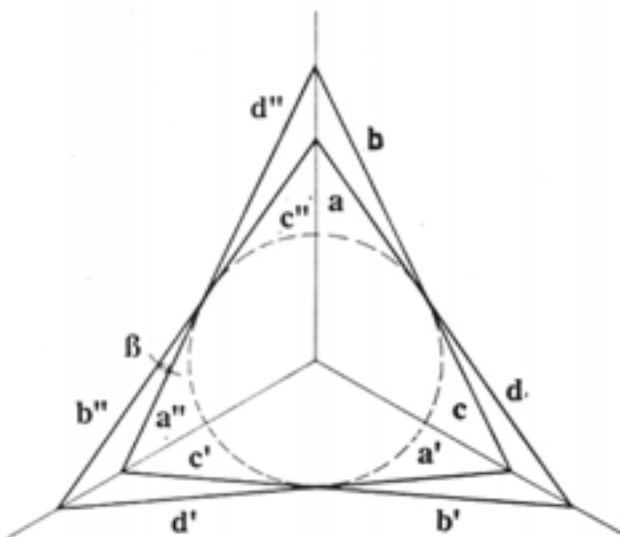


FIG.6 TRISSISSOR

La transformabilidad de una estructura implica un costo mayor con relación a estructuras ensamblables debido a sus conexiones móviles que resultan costosas, a los mecanismos de trabado y mecanismos de desplegado. Sin embargo, este costo extra se balace por el gran potencial de adaptabilidad, movilidad y ahorro de mano de obra.

Hay otras circunstancias donde las dificultades de transporte, la hostilidad de medio, etc, hacen de estas estructuras la única alternativa.

### ESTRUCTURAS TRANSFORMABLES DE BARRAS, REQUISITOS DE DISEÑO

En este trabajo nos referiremos principalmente a estructuras de barras con bisagra de tijera. En el diseño y construcción de este tipo de estructuras deben seguirse los siguientes criterios :

#### REQUISITOS GEOMETRICOS

El elemento básico de las estructuras transformables de tijera es el que se ilustra en la fig.3

Este elemento deformable, tiene como peculiaridad que la variación de la posición espacial de cualquiera de las barras que forman el conjunto producirá un cambio en las dimensiones de este y de la posición de todos sus componentes. Si su altura "H" es modificada, la dimensión "L" cambiará en proporción a la variación de "H" de acuerdo al número de cruces y el largo de las barras. Cuando "H" es igual a  $b=a$  el conjunto se encuentra en su configuración cerrada, y cuando "H" se aproxime a altura cero, el conjunto se aproximará teóricamente a una línea recta y "L" será máxima. Para que este conjunto llegue a una configuración cerrada la única relación que debe cumplirse es la de que alrededor de cualquier par de nodos  $A, B$ ,  $a+b' = a'+b$ . Manteniendo esta relación se hacen posibles nuevas combinaciones con nuestro elemento básico. Si intersectamos dos de estos conjuntos perpendicularmente se crea un conjunto tridimensional (fig.4); intersectando tres planos (fig.5) se obtiene otra configuración espacial cuyo elemento básico es el triscissor (fig.6), el cual es un ensamblaje móvil de seis barras, seis nodos y tres bisagras de tijera, en el cual todas las barras están sobre un mismo plano para un valor dado del ángulo  $\beta$ ; a medida que  $\beta$  aumenta el ensamblaje sale fuera del plano pasando por una forma tridimensional alcanzando un estado límite unidimensional para  $\beta=180$  grados. Esta acción crea restricciones en los valores relativos de  $a, b, c, d$ . Es

condición suficiente y necesaria para la movilidad del triscissor que las seis barras en el plano sean tangentes a un círculo. El triscissor es una unidad básica importante para algunas formas tridimensionales como cúpulas. Hasta ahora hemos tratado solo con estructuras planas en las cuales  $a=a'$  y  $b=b'$  ¿pero que sucede si el eje de rotación es desplazado del centro?. Haciendo  $a < a'$  y  $b' > b$ , el conjunto básico comienza a doblarse (fig.7), a mayor diferencia de  $a, a'$  y  $b', b$  menor es el radio de la curva. El radio de la curva y el número de tijeras definirán el largo  $a+a'$  y  $b'+b$ . El largo de las barras y la posición del eje de rotación pueden ser calculados de acuerdo al radio de la curva deseada y el número de divisiones. Escogamos un arco de radio R dividido en seis partes iguales (fig.8), el largo  $L = a+a'$  es igual a  $R \cdot \tan \theta = L$  donde  $\theta = 180 / 6(\# \text{ de partes}) = 30$ , y  $a = R \tan \theta / 2$ ,  $a' = L - a$ , y debido a que cada tijera es simétrica  $a=b, b'=a$ .

Con el mecanismo de bisagra de tijera es posible construir una gran variedad de estructuras transformables de barras, estructuras planas, estructuras con curvatura simple o doble, positiva o negativa, siguiendo el método descrito. Una estructura abovedada se obtiene por repetición de un arco, si el arco es rotado se obtiene un domo. Las mismas geometrías pueden obtenerse utilizando el triscissor como unidad básica.

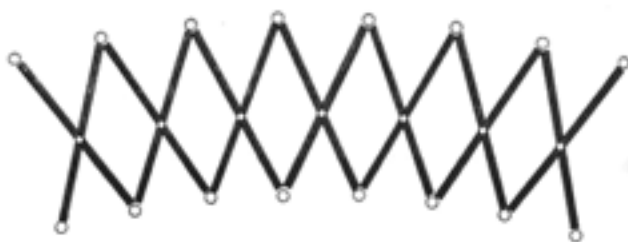


FIG.7

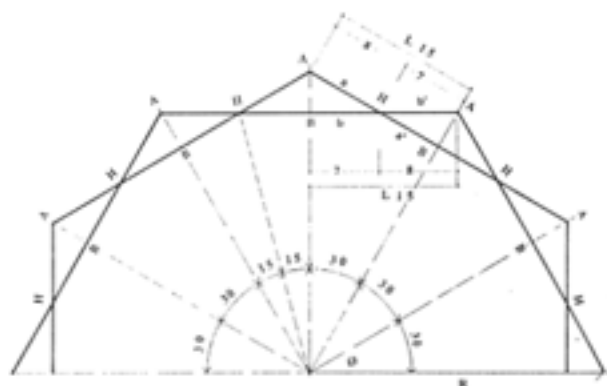


FIG.8

El elemento básico puede también intersectarse oblicuamente en vez de hacerlo sobre planos verticales, así mismo se pueden crear nuevas configuraciones utilizando barras de dimensiones diferentes o superponiendo varios planos de tijeras.

### REQUISITOS ESTRUCTURALES

Obviamente un requisito estructural esencial para todas las formas que nos interesan es que ellas deben mantenerse y no colapsar. Igualmente deben soportar su propio peso y las cargas vivas a las cuales serán expuestas ( viento, agua, nieve, otros componentes unidos a la estructura, etc.) y bajo condiciones normales deben poseer márgenes adecuados de rigidez en todos los elementos estructurales y sus conexiones. El elemento básico de las estructuras transformables de tijera que vimos anteriormente (fig.3) es inestable, ya que posee un cierto grado de libertad, y no tiene propiedades estructurales. Si la altura "H" de este elemento se fija, este podrá soportar fuerzas que actúen en su plano; como este elemento no está triangulado, las barras trabajan a flexión, con la adición al sistema de miembros que trabajen a compresión o tensión, los esfuerzos de flexión pueden ser reducidos y el sistema se comportara como uno triangulado, donde los esfuerzos se transmiten por compresión o tensión. Con el uso de formas estructurales mas adecuadas, y por el trabado de los nodos móviles las características estructurales del sistema puede ser mejoradas.

### NODOS

El comportamiento exitoso, la duración y confiabilidad de las estructuras transformables va a depender en forma importante de sus nodos. Los nodos son puntos de convergencia de fuerzas, y su habilidad para resistir y transmitir estas fuerzas determinara en gran medida la solidez de la estructura. Los nodos deben cumplir con los siguientes criterios:

- 1- Deben transmitir las fuerzas homogéneamente a través de todos los componentes que llegan a él.
- 2- Deben sostener firmemente todas las barras y elementos que convergen hacia él.
- 3- Debe darle a cada barra suficiente libertad para ir de una configuración cerrada a la abierta y viceversa, evitando a las vez que estas estén demasiado sueltas.
- 4- En los casos donde la reusabilidad es requerida, el nodo debe ser diseñado para resistir las fuerzas creadas durante el proceso de erección, disminuyendo la fatiga del material.

5- La fricción entre las partes móviles debe reducirse al mínimo para evitar el desgaste excesivo y para facilitar los procesos de erección y plegado.

6- Dado que trabajamos con conexiones móviles, es importante tomar en cuenta cuando se diseña y escoge el material de estas, que la transferencia de fuerzas entre cuerpos que no están unidos uno al otro solo puede ocurrir a través de la presión aplicada por un cuerpo contra el otro. Los valores de los esfuerzos de compresión o tensión crecen en la junta. El flujo de las fuerzas compresivas se curva en la cercanía de la junta, resultando una acción de halado interno hacia el centro del elemento; esta acción siempre provoca el desarrollo de una tensión transversal en el material del elemento. Por esto es importante utilizar materiales resistentes a la tensión alrededor de la conexión.

### MECANISMOS DE APERTURA Y CERRAMIENTO

Otro aspecto fundamental a considerar cuando se diseña una estructura transformable es el mecanismo de apertura/cerrado. A medida que el tamaño y el peso aumentan, el cerrado o apertura de la estructura transformable comienza a ser un factor mas y mas problemático en el funcionamiento efectivo del concepto. A las estructuras se les debe proveer de mecanismos que realicen la operación de apertura / cerrado. Estos mecanismos pueden ser desde manuales hasta totalmente automatizados, inclusive los manipulados a control remoto. Pero ello depende

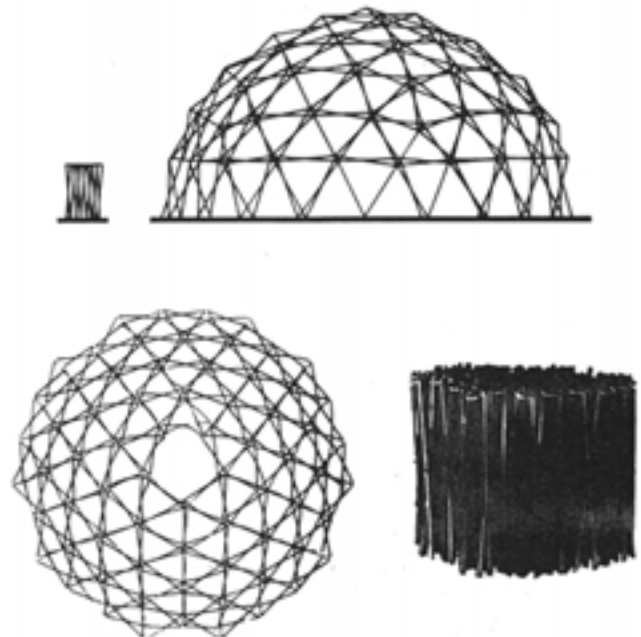


FIG.9 DOMO GEODESICO TRANSFORMABLE, Vista lateral y Maqueta.



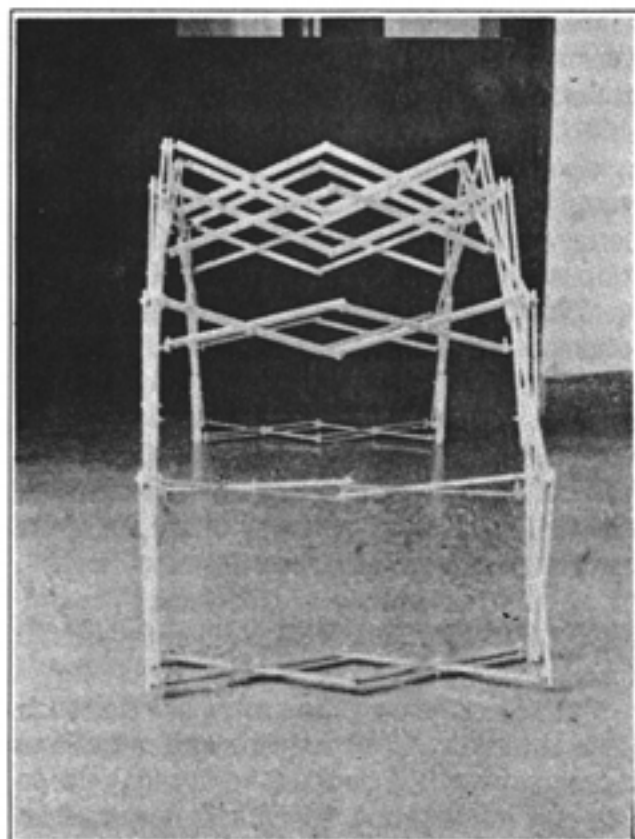


FIG.10 VISTA LATERAL MAQUETA DE BOVEDA.

de cada estructura en particular, de su peso, tamaño, frecuencia y condiciones de desplegado, factores ambientales, existencia de fuentes de poder, etc.

Los mecanismos de apertura /cierre pueden ser sistemas hidráulicos, tornillos movidos a motor o manualmente, mecanismos con cables y poleas, mecanismos movidos por resortes, etc. Pero cualquiera que sea el mecanismo este debe producir un movimiento homogéneo y controlado de todas las partes. Ya que la mayoría de las estructuras inician su proceso de desplegado corriendo sobre la superficie donde son erigidas, es conveniente montarlas sobre ruedas de manera de reducir la fricción con la superficie y por lo tanto la fuerza necesaria para la erección.

## CUBIERTAS

La mayoría de las aplicaciones de estructuras transformables conllevan el diseño de un sistema de cubierta y cerramiento, el sistema de cerramiento puede estar unido a la estructura o libre, puede ser parte permanente de esta o puede ser colocado después que la estructura ha sido desplegada. Puede también operar como miembro estructural, de estabilización, o elemento de trabado. Generalmente las cubiertas son

construidas partiendo de materiales livianos y flexibles los cuales pueden soportar tensión, tales como nylon o telas de fibra de vidrio, recubiertas de teflon, PVC, PVDF, etc, también pueden ser construidas de materiales rígidos como lamina metálica o plástico.

## MATERIALES

La estructura debe ser construida con materiales livianos pero al mismo tiempo suficientemente resistentes para soportar los esfuerzos y deformaciones a las cuales es sometida; en algunos casos la flexibilidad es una propiedad deseable; materiales como el aluminio, acero laminado, plásticos, o materiales compuestos como fibra de vidrio - poliéster/epoxi, o grafito-epoxi son usados comúnmente. Para los elementos a compresión o flexión de la estructura, las barras tubulares son una solución razonable debido a su relación peso/resistencia y su buena resistencia a esfuerzos de flexión; para los elementos de tensión, se usan cables de acero de alta resistencia o tejidos.

## OTROS REQUISITOS

No solo es importante que la estructura tenga solidez estructural, las relaciones geométricas entre sus partes deben ser todo lo correctas que permitan a la estructura transformarse y adquirir la forma deseada. Así mismo deberá ser confiable y construible. Una estructura transformable no tiene ninguna ventaja si no puede ser abierta, cerrada, y reusada.

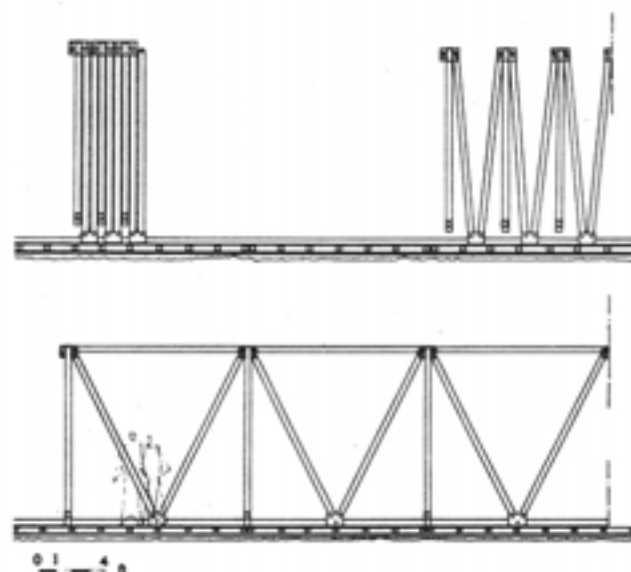


FIG.11 DETALLE DEL DESPLEGADO DEL PISO

Como lo mencionamos anteriormente los nodos son puntos cruciales, pero el dimensionado y posición correcta de todas las partes es tan importante como estos. En los muchos modelos que hemos construido los problemas presentados durante el proceso de transformación fueron generalmente ocasionados por pequeños errores en las dimensión de algún elemento o su posición. La variedad de componentes debe de ser lo menor posible para reducir estos problemas y al mismo tiempo facilitar la producción de las partes, el ensamblaje, y reducir el costo de la estructura. La confiabilidad y por lo tanto el comportamiento exitoso de las estructuras transformables depende de un diseño que tome en consideración el ambiente y las condiciones donde la estructura sera usada y reusada, escogiendo piezas y materiales adecuados a esa situación específica.

En los pasados tres años se han diseñado y construido mas de treinta modelos de estructuras transformables A continuación hacemos una pequeña descripción de algunos proyectos que muestran aplicaciones de este tipo de estructuras.

PROYECTOS

1- La fig. 9 muestra un domo geodésico transformable que tiene como unidad básica el triscistor, el sistema completo puede plegarse a un paquete compacto que ocupa un volumen de solo el 10% del volumen total. Es una estructura auto portante que no puede soportar cargas adicionales a su propio peso, su

estabilidad en la configuración abierta se logra por la flexión que sufren sus miembros en etapas intermedias del desplegado.(C.H. Hernandez, W.Zalewski, MIT 1985)

2- La fig.10 muestra una estructura auto soportada abovedada construida a base de nodos de aluminio macizo y tubos . La estructura se estabiliza cuando los elementos en flexión pasan un punto critico intermedio. Su capacidad estructural fue mejorada al construirla basada en arcos alternos de diferentes radios de tal manera que se obtuviese una estructura similar a una lamina plegada.(C.H. Hernandez, W. Zalewski, IDEC 1983)

3-Proyecto de un piso transformable para una planta ensambladora de vehículos (fig.11 y fig.12), basado en una retícula cuadrada de 11'6" x 11'6" de marcos rígidos y elementos diagonales plegables, contruidos con tubos y nodos (180º) de acero apernados. Este tipo de piso le otorga independencia del terreno a la planta, fácil transportabilidad, rápida instalación y máxima flexibilidad, permitiendo cambios de configuración y de locación, el paso de las instalaciones y su mantenimiento, y, a la vez, provee una base solida que distribuye las cargas permanentes o temporales a toda la estructura (Metioni B., MIT 1987).

4-Proyecto para un espacio temporal de exhibiciones. Diseñado para ser montado y desmontado en un periodo de 3 semanas. La estructura esta

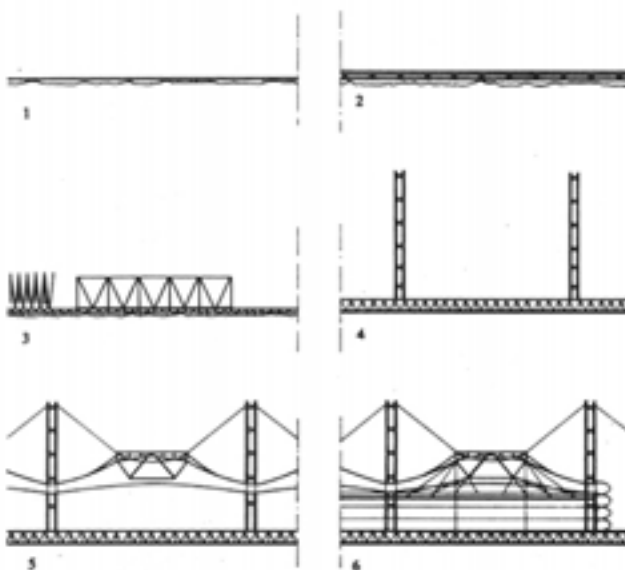


FIG.12 PROCESO CONSTRUCTIVO

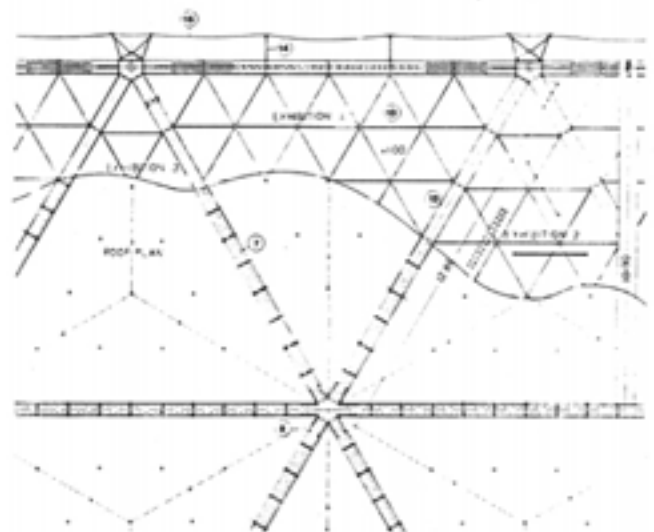


FIG.13 PLANTA DE TECHO

compuesta por una serie de retículas espaciales, triangulares, transformables (fig.13), unidas y soportada por columnas de aluminio colocadas en los vértices de los triángulos, la retícula espacial esta constituida de tubos de aluminio ovales y nodos fundidos (fig.14), siendo desplegada manualmente y levantada a su lugar por poleas (fig.15), finalmente es estabilizada y bloqueada por los componentes del entrepiso que sirven al mismo tiempo de elementos superiores de compresión. La capacidad de carga de la retícula espacial es mejorada con la colocación de cables postensados que van de cada columna al centro de cada unidad triangular. La cubierta esta elaborada con nylon recubierto de teflon unido a la estructura de aluminio.(fig.16)(building Technology MIT 1985).

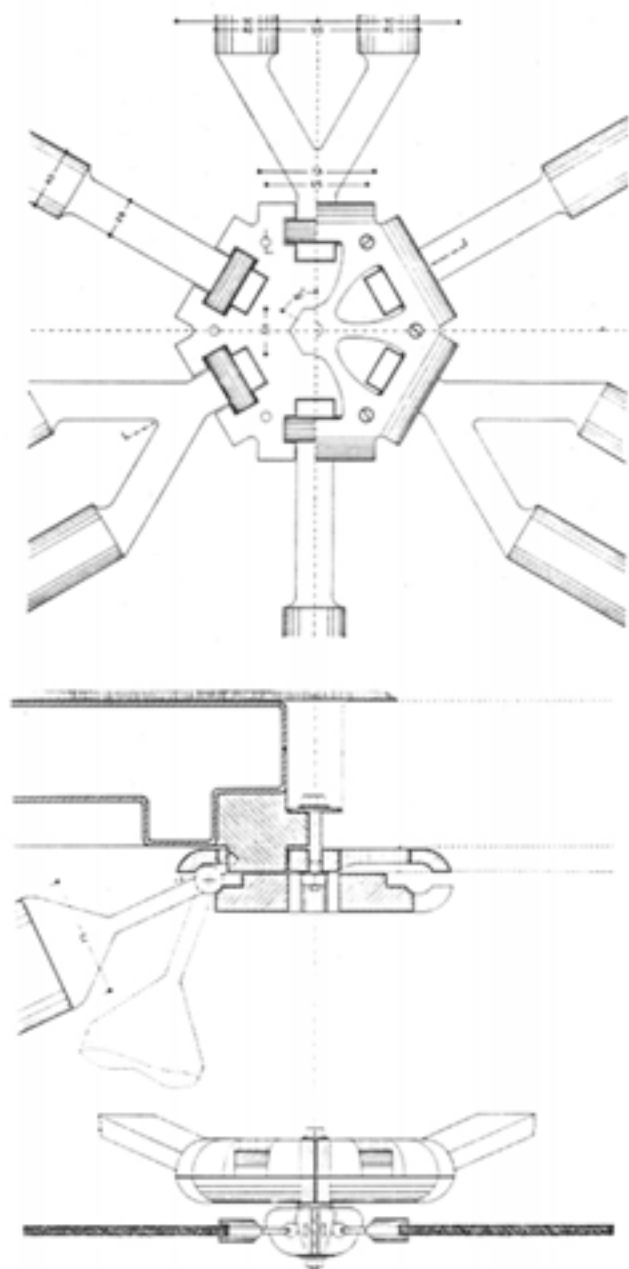


FIG.14 NODO PARA PISO Y ENTREPISO PLEGABLE

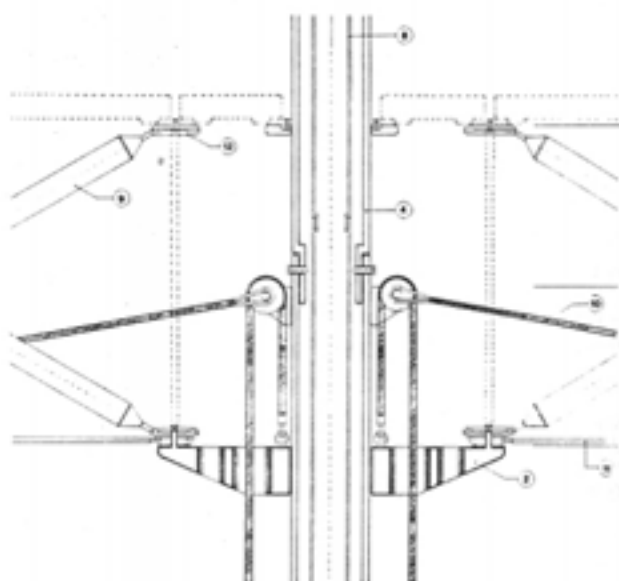


FIG.15 SECCION QUE MUESTRA EL SISTEMA DE POLEAS

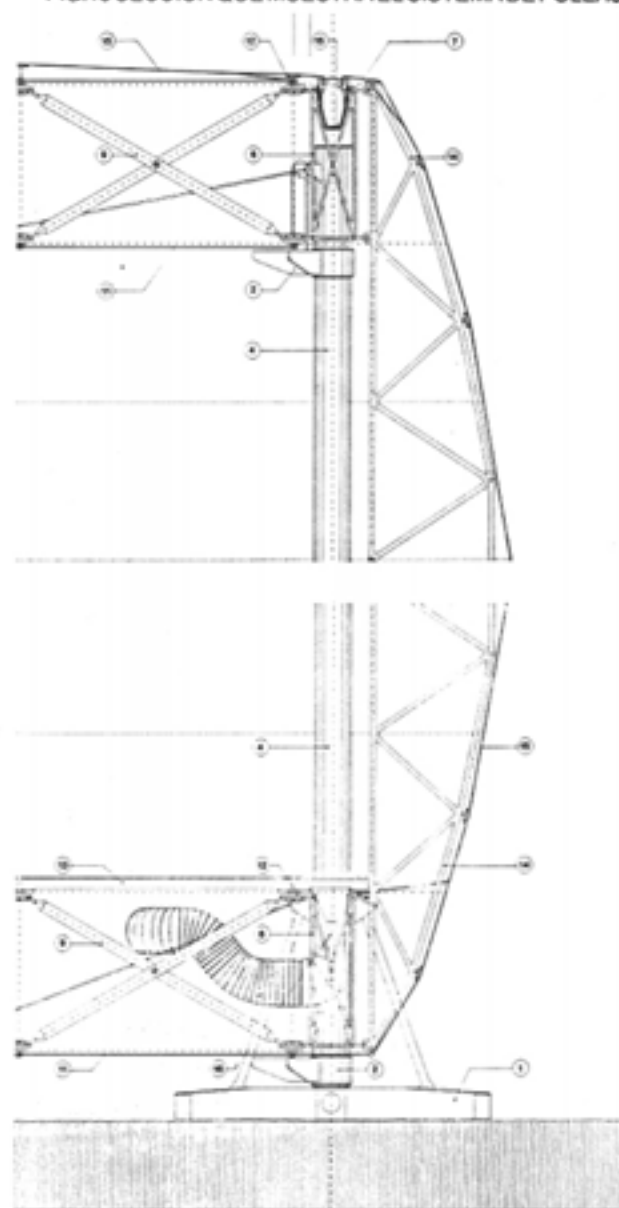


FIG.16 DETALLE DE LA ESTRUCTURA



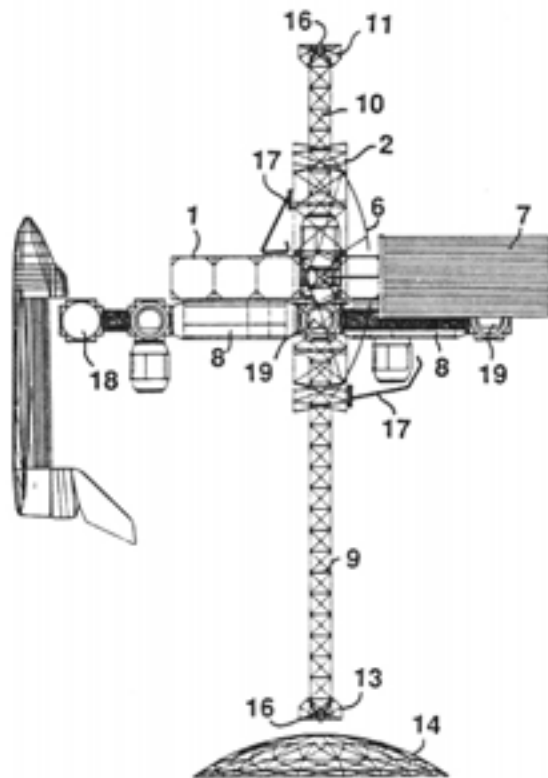


FIG.17 ESTACION ESPACIAL PROYECTO MIT 1986

5- Proyecto para el sistema estructural de la estación espacial de la NASA 1990 (fig.17). En este proyecto se escogió una estructura transformable con un sistema de desplegado en un solo sentido de resorte, la cual es puesta en órbita en un viaje del transbordador espacial en su cabina de carga de 18 mt x 4.5 mt de diámetro. La operación de construcción de la estación comienza con el desplegado de la plataforma la cual esta basada en módulos cúbicos de 5 mt x 5 mt x 5 mt (fig.18), la plataforma de 35 mt x 25 mt es desplegada continua y automáticamente en tres dimensiones a una velocidad controlada. Cada modulo de la plataforma esta formado por 4 barras rígidas (24) y 8 barras plegables (23) que pivotan en (21) en el nodo (20). El arriostramiento entre (24) y (23) se logra con la barra (22). Cuando la barra (24) llega a posición horizontal el anillo (30) se desplaza sobre la junta bi-pivotal al descargarse el resorte (29) trabandola en su posición final(fig.19) El nodo (20) (fig.20-21) consiste en una caja de aluminio y cuatro puntos de pivote para la conexión de cuatro barras, que al mismo tiempo provee de un punto de sujeción para otros componentes de la estructura. La fig.22 muestra el hangar plegable de esta estación para la reparación de satélites.(Building Technology MIT 1986)

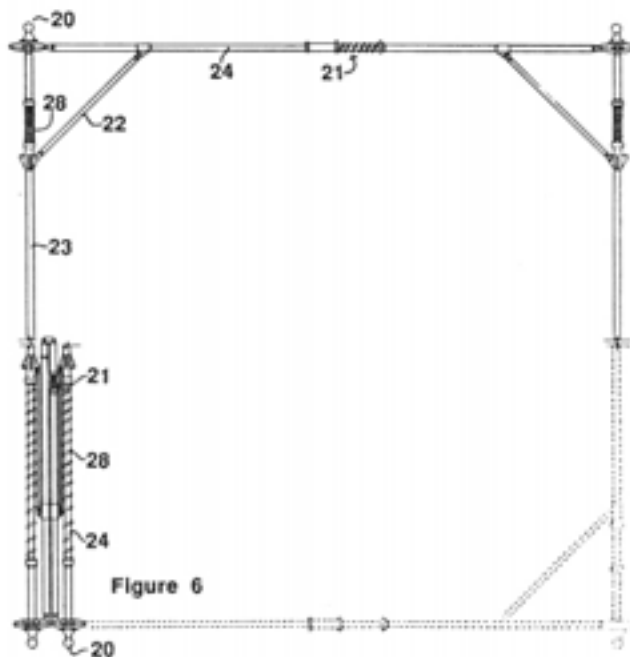


FIG.18 VISTA LATERAL DEL MODULO DE LA ESTRUCTURA

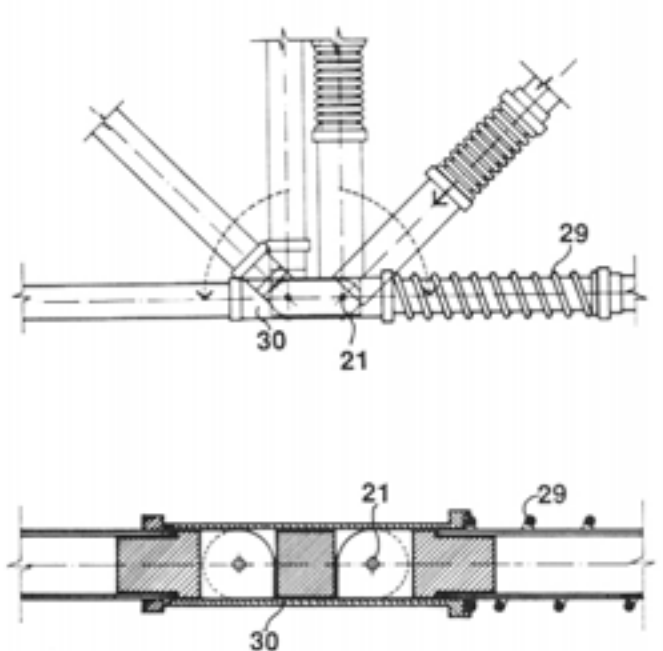


FIG.19 DETALLE SISTEMA DE TRABADO

6- Proposición de cubiertas semi-permanentes para una plaza. En este proyecto se escogió utilizar un grupo de grandes paraguas que pudieran ser desplegadas para la realización de actividades como ferias y exposiciones utilizando como postes de

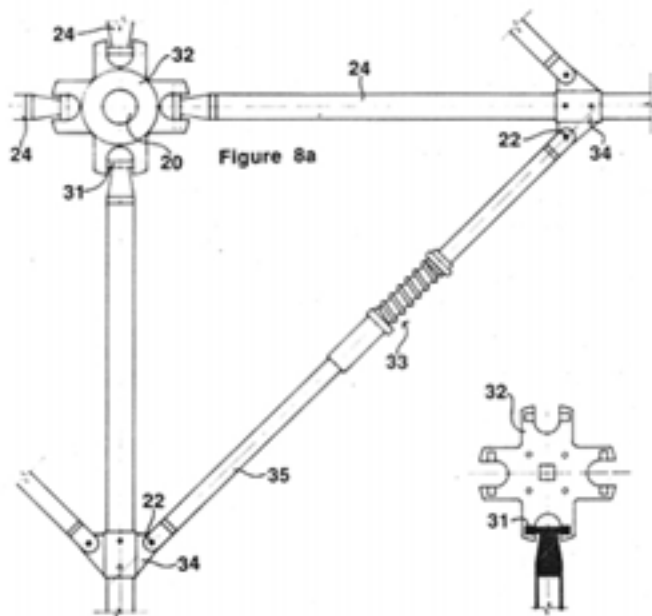


FIG.20 VISTA SUPERIOR DEL NODO

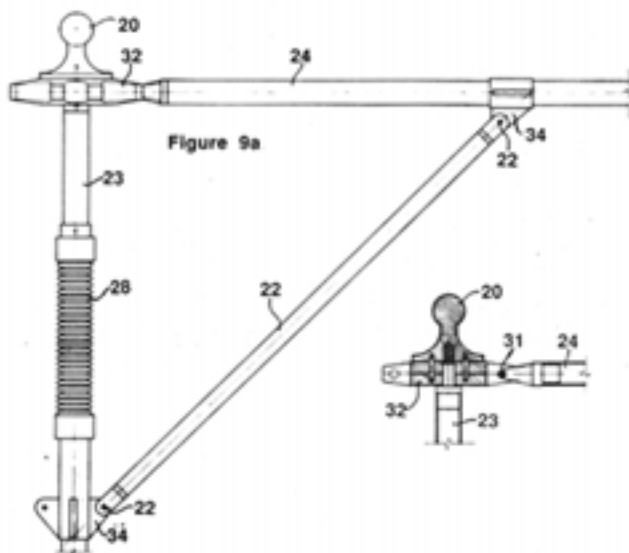


FIG.21 VISTA LATERAL DEL NODO

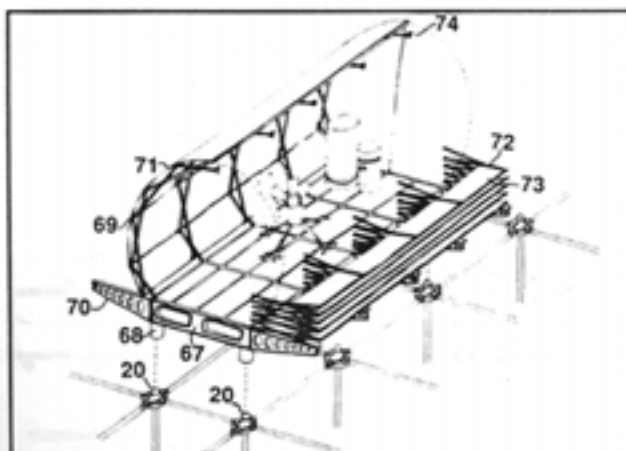


FIG.22 HANGAR PLEGABLE PARA REPARACION DE SATELITES

iluminación el resto del tiempo. La fig.23 muestra una elevación de la estructura, formada por un soporte central de aluminio permanentemente unido al piso y que sujeta seis brazos 6.2 mt los cuales son elevados por un grupo de cables movidos por un winche (fig.24), la cubierta es una membrana liviana y resistente unida al final de cada brazo y al soporte, al ser elevados los brazos, la membrana es tensada llevando toda la estructura a la estabilidad. Los brazos fabricados con tubos de aluminio actúan como elementos de compresión y flexión mientras los cables de elevación y la membrana actúan como elementos de tensión superior e inferior respectivamente. Fig.25 muestra el proceso de erección. (C.H.Hernandez, W. Zalewski, MIT 1987)

### PROYECTO ESTRAN1

El proyecto nace de la necesidad de aplicar a un prototipo las experiencias de estructuras transformables recabadas con modelos en los pasados años. Las dimensiones de este prototipo deberían ser tales que permitiesen su aplicación en la solución de situaciones y requerimientos reales. Este proyecto se está realizando bajo los auspicios del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC-UCV), FUNDALUM (Fundación para la Investigación, Desarrollo y Promoción del Aluminio), y el Dr. W. Zalewski. (MIT).

El Estran 1 como primer prototipo que se construye a escala real tiene como objetivo de ensayar los conceptos desarrollados utilizando modelos a escalas reducidas, determinar y resolver los problemas constructivos, de manejo, de estabilidad tanto estructural como a factores ambientales, resistencia al desgaste por uso y su aceptación por los usuarios potenciales.

La estructura se diseñó con criterios de economía y de sencillez constructiva, utilizando elementos existentes en el mercado nacional o de muy fácil fabricación. Se utilizó en lo posible aluminio para mantener el peso de la estructura lo más bajo posible y facilitar su manejo. Como forma estructural fue seleccionada la bóveda cilíndrica ya que esta resulta la más adecuada para su uso como hangar plegable (existe un mercado militar para este tipo de uso). La bóveda cilíndrica de configuración cuadrada es una de las más simples de construir debido al mayor número de elementos de dimensiones iguales y nodos más simples que los que se requieren para otras

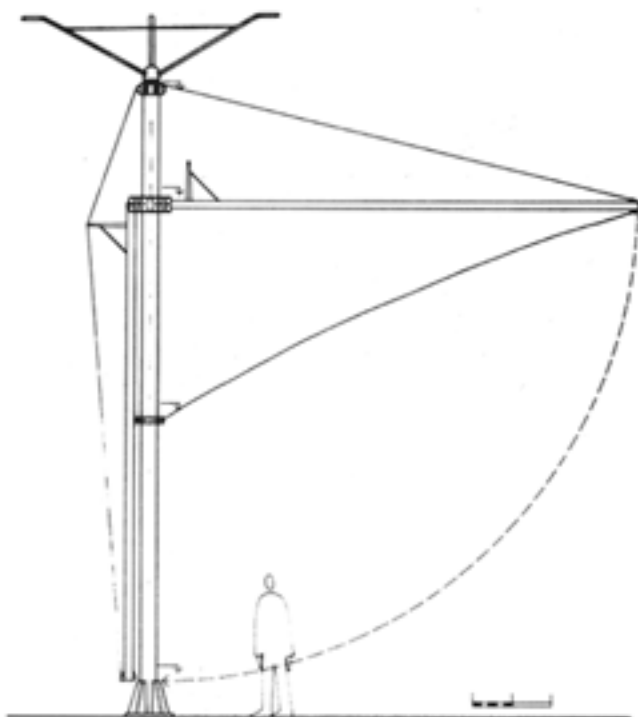


FIG.23 ELEVACION DE CUBIERTA TIPO PARAGUA

configuraciones y formas estructurales. Presenta algunos problemas de estabilidad que han sido resueltos con la incorporación de tensores y la participación estructural activa de la cubierta, lo que redundó a su vez en una reducción del peso. Se determinó que el largo máximo de los elementos para el fácil manejo y movilización de la estructura era de 4.5 mt, elementos más largos mostraron ser muy difíciles de controlar por los operarios encargados del transporte y el despliegue de la estructura.

El Estran 1 es una retícula espacial transformable® de superficie generatriz cilíndrica de configuración cuadrada, con un área de cubierta de 274.8 m<sup>2</sup>, un área proyectada útil de 104 m<sup>2</sup> para alturas de 2.6 mt

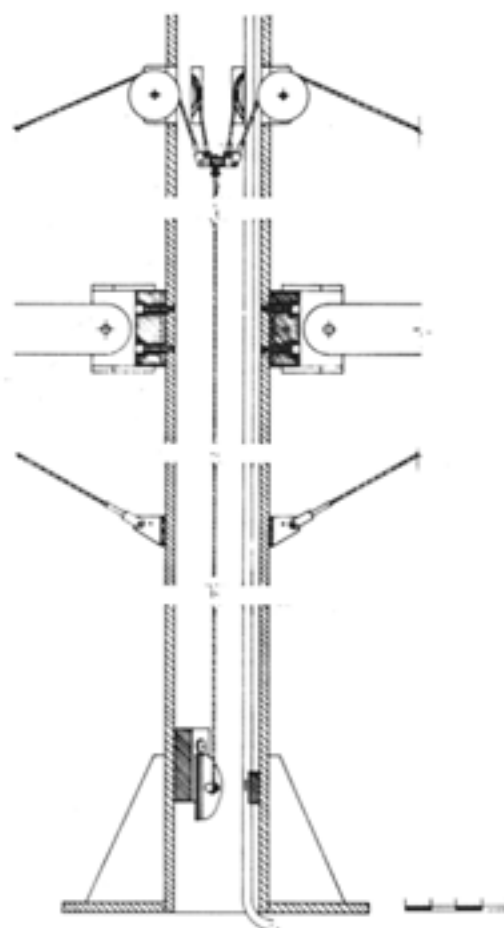


FIG.24 SECCION ATRAVEZ DE SOPORTE CENTRAL

a 7 mt, área total cubierta 128 m<sup>2</sup>. Plegada conforma un paquete compacto de 4.5 mt X 1 mt X 1 mt con un peso aproximado de 450 Kg que requiere de un área libre de 253 m<sup>2</sup>. Su despliegue se realiza en un minuto y en una hora se concluye su fijación y estabilización

El prototipo está formado por tres arcos paralelos (fig.26), un arco central y dos exteriores unidos por catorce brazos iguales, perpendiculares a los arcos

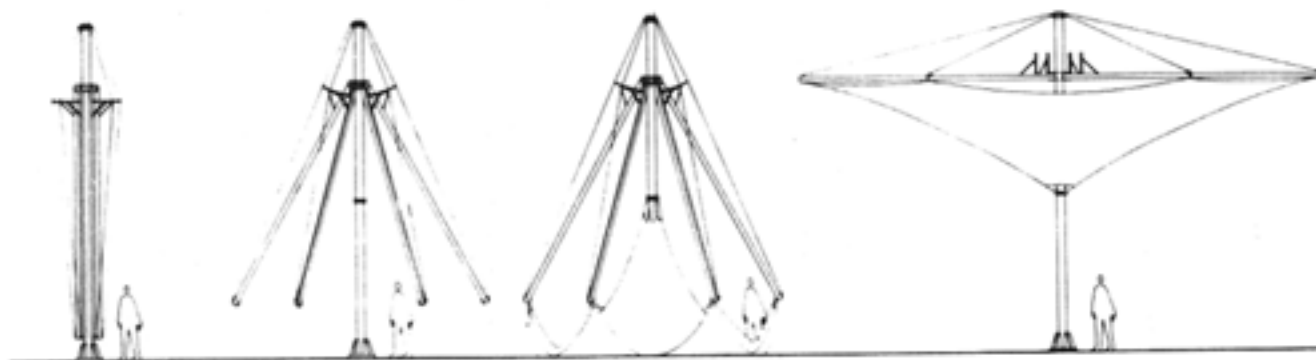


FIG.25 PROCESO DE APERTURA DE PARAGUAS

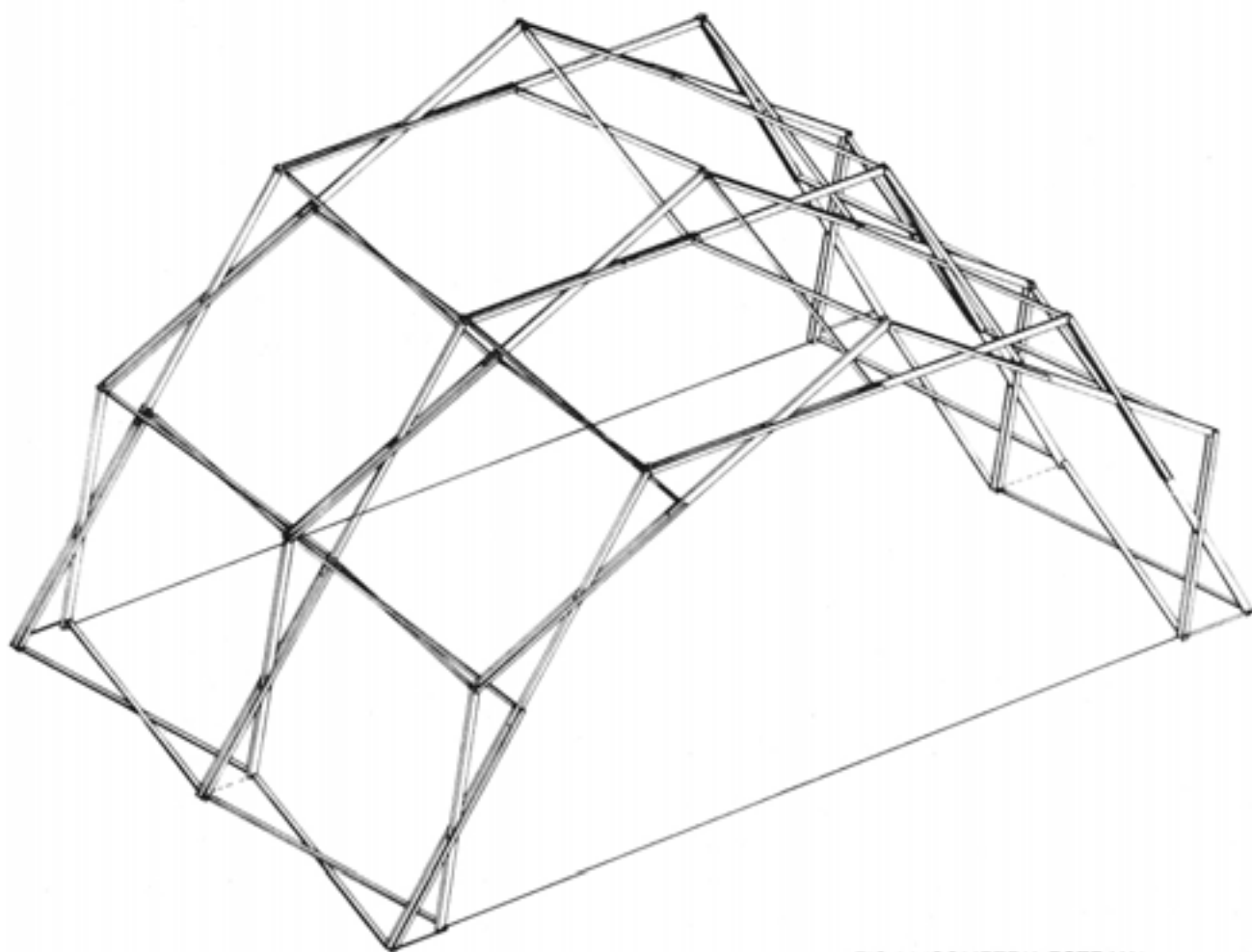


FIG.26 ISOMETRIA ESTRAN1

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 elementos lineales de aluminio de sección rectangular, un elemento central de mayor sección (45 mm X 100 mm) **A1**, **A2**, ó **A4** y dos

elementos exteriores, uno a cada lado del anterior de menor sección (32 mm X 75 mm) **A3**, **A5**, ó **A6** todos pivotando sobre un eje común **N3** 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

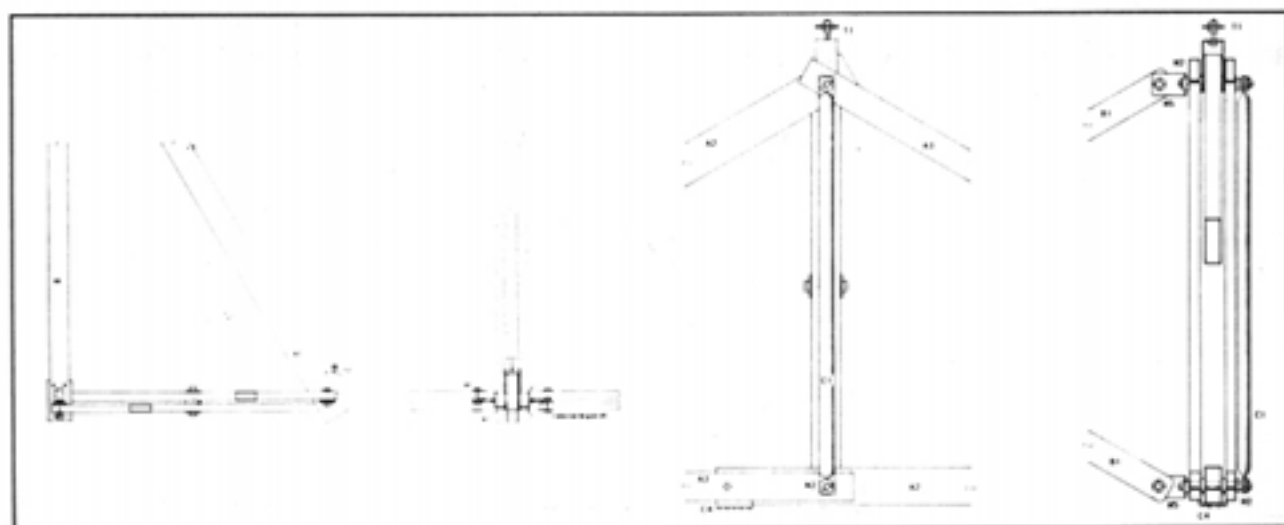


FIG.27 DETALLE CONEXIONES ARCOS EXTERIORES

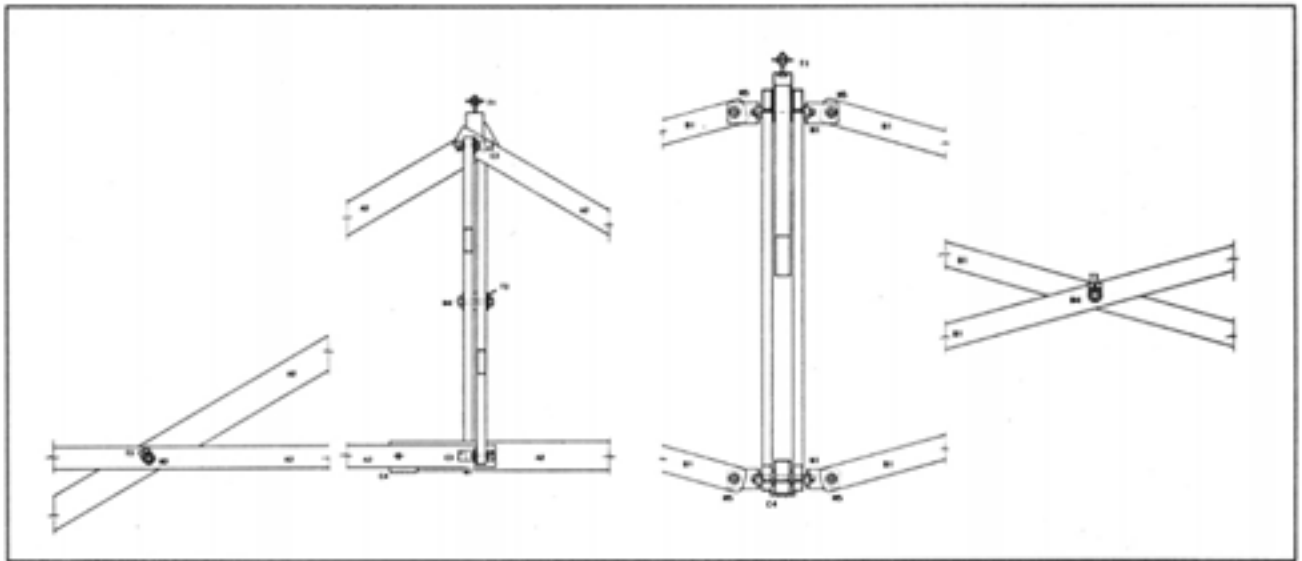


FIG.28 DETALLE DE CONEXIONES ARCOS INTERIORES

y del nodo **N2** para elementos de los arcos externos, de manera similar los elementos externos **A3** del primer ensamblaje se conectan al elemento **A1** del siguiente ensamblaje, en un proceso similar los extremos de los elementos de la segunda tijera se conectan con la siguiente hasta completar las seis tijeras que forman cada arco. Los brazos están formados por dos elementos lineales de sección 32 mm X 75 mm **B1** que pivotan sobre el nodo **N4**, los extremos de los elementos **B1** se unen a los arcos sobre los nodos **N1** ó **N2** y pivotan sobre **N5**, los elementos **B1** se unen en un extremo con una posición alta de un arco y en el extremo opuesto en una baja del arco siguiente (fig.27-

28). Estos elementos conforman una retícula de base cuadrada la cual es triangulada por tensores fijados en **C3** sobre los nodos **N1** ó **N2**. Los nodos son construidos de acero y se aíslan mediante bocinas y arandelas de poliuretano rígido de los elementos de aluminio evitando la corrosión galvánica y reduciendo la fricción entre las piezas móviles. La cubierta elaborada de tela de poliéster recubierta de PVC, forma parte permanente de la estructura, se fija sobre esta a través de los elementos **T1**, los cuales sujetan la membrana por presión entre dos discos que a la vez sellan la junta. Las piezas terminales **T2** permiten controlar la tensión sobre la cubierta.

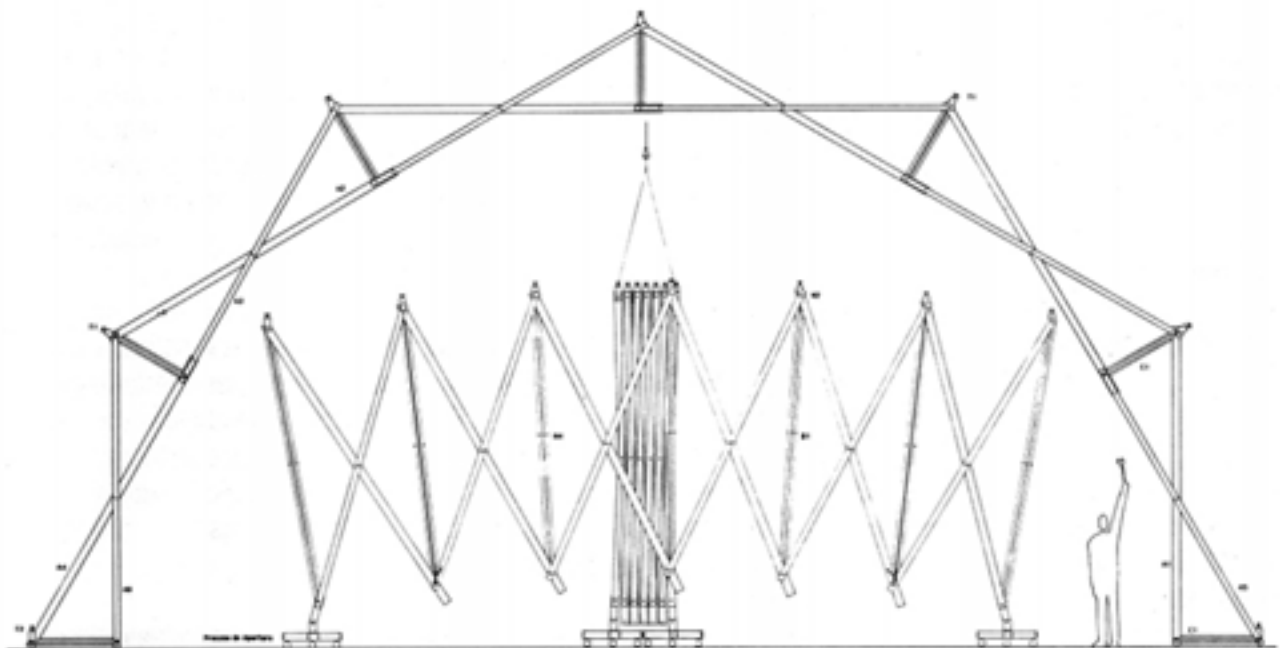


FIG.29 PROCESO DE APERTURA



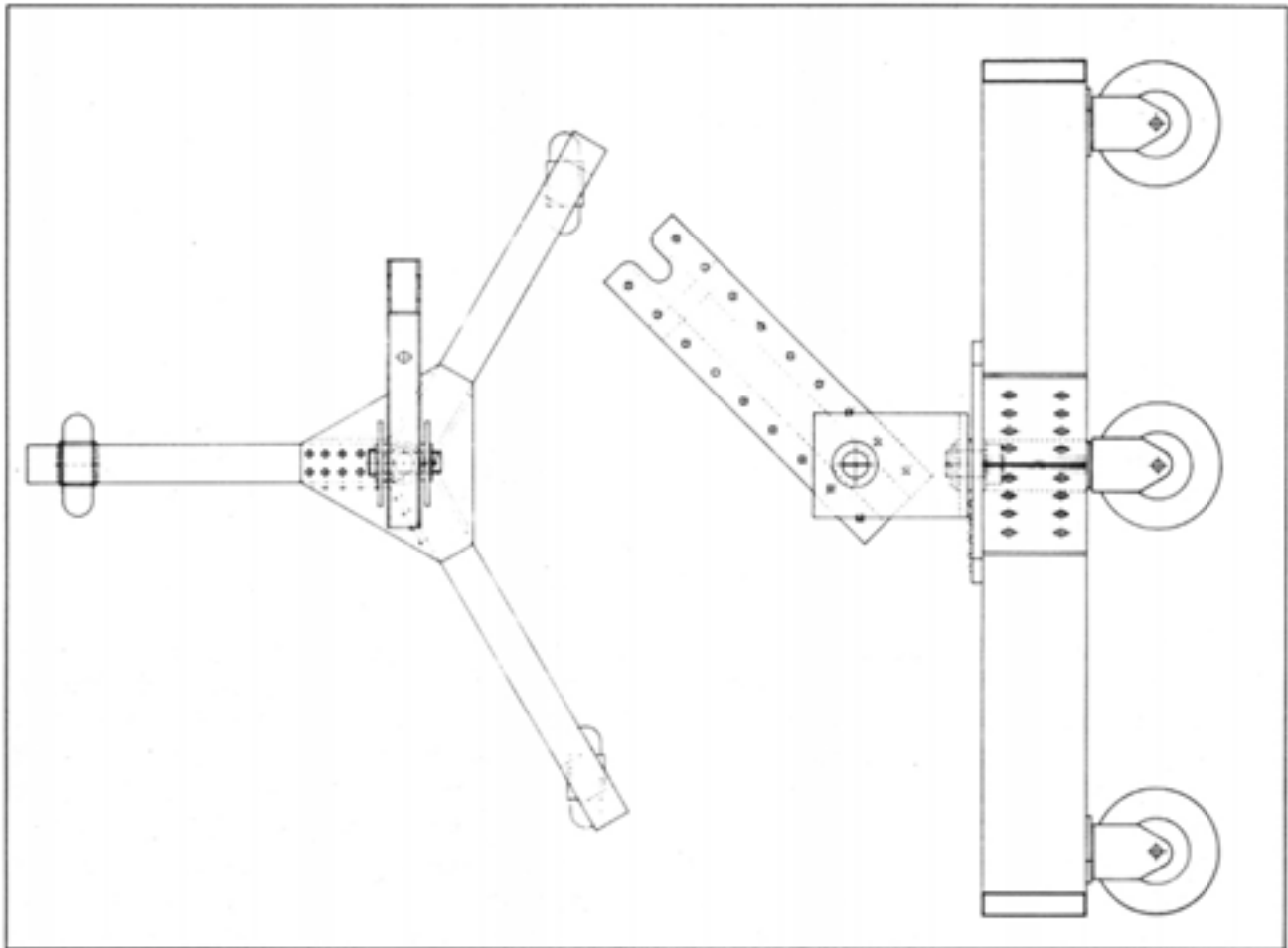


FIG.30 DETALLE, PATINES

La estructura transportada horizontalmente como un paquete compacto es levantada (fig.29) a la posición vertical y montada sobre 4 patines (fig.30) que facilitan el movimiento sobre la superficie donde se despliega la estructura. En una primera etapa de despliegue los cuatro extremos del paquete son halados diagonal y simultáneamente hasta que la estructura comience a curvarse, se concluye el despliegue utilizando señoritas colocadas en los extremos de los dos arcos exteriores; el conjunto se ira curvando hasta que los topes colocados en los extremos de los elementos **A2** detengan el movimiento, (el uso de una grúa pequeña o una pluma telescópica incorporada al camión que transporta la estructura facilita grandemente el proceso de apertura) .Se procedera entonces a colocar los pasadores **D2** y las barras de trabado **C1** entre cada dos nodos **N2** pertenecientes a un mismo radio, esto estabilizara el conjunto en su configuración desplegada, luego se fija la estructura al terreno donde permanecera durante su utilización o se colocara un cable entre los puntos de apoyo de la estructura en el caso de no fijarse al terreno.

El comportamiento de la estructura ha sido muy

satisfactorio, y no se observa un deterioro significativo en sus partes móviles después de 50 aperturas. 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 de el prototipo ensayado, para áreas mayores sera necesario construir las cubiertas a partir de varios paquetes o la utilización de equipos mas pesados. Otra limitación en el tamaño del paquete o del tamaño 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

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

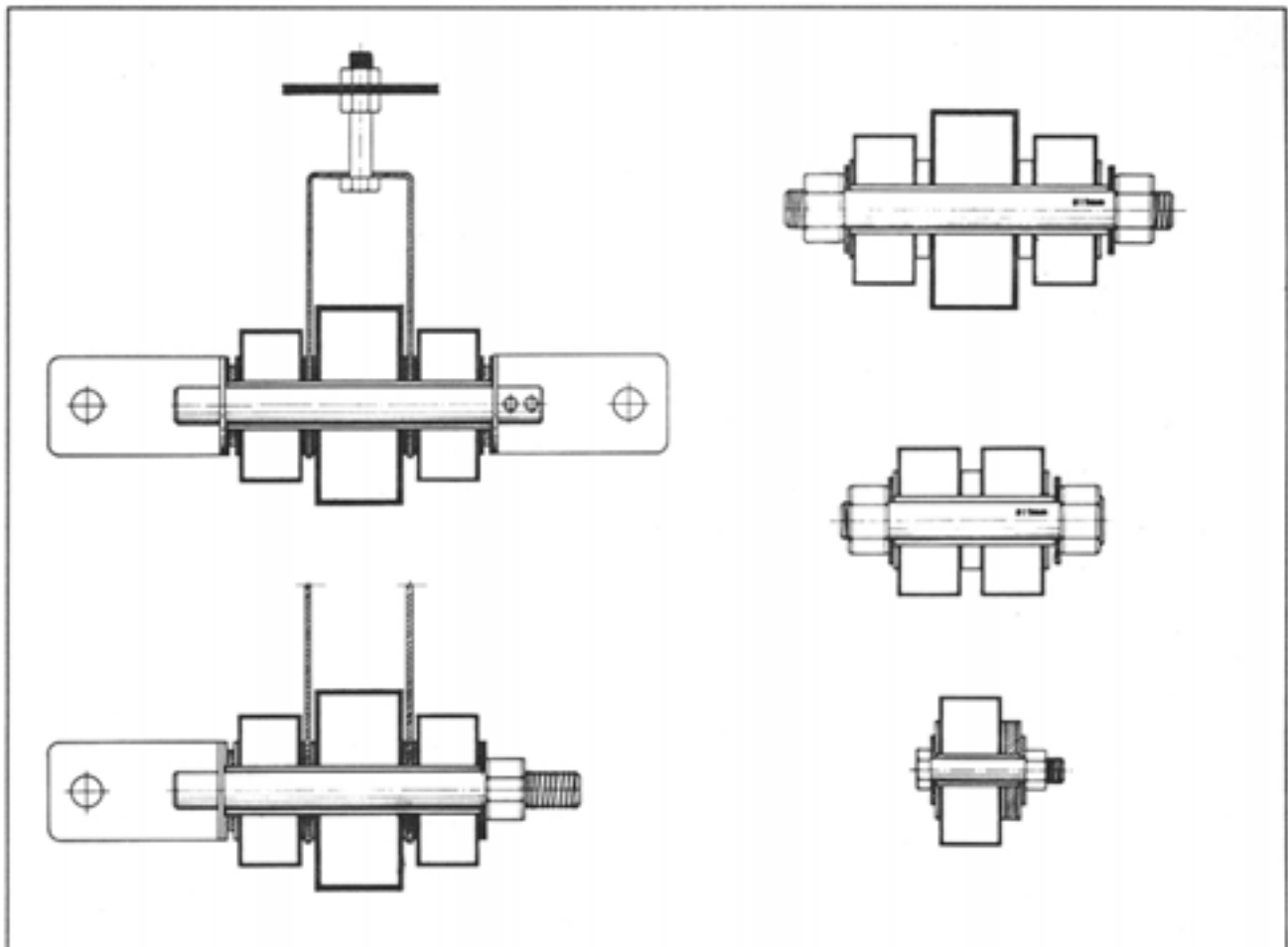


FIG.31 DETALLE DE LOS NODOS DEL ESTRAN 1.

## REFERENCIAS:

- 1-Roger N. Dent "Principles of pneumatic architecture" The architectural press, London 1971.
- 2-William Zuk "Kinetic Architecture" Van Nostrand Reinhold Company, New York 1970.
- 3-Rowland Mainstone "Developments in Structural Form" The MIT press, Cambridge, Mass. 1983.
- 4-B. S. Benjamin " Architectural and Structural evolution of Dome Shelters"
- 5-AFAPL TR 68-17, Transactions "Third Aerospace Expandable and Modular Structures conference" Sponsored by: Air force Aero propulsion laboratory ( Space Technology Branch ) Wright Paterson Air Force Base, dayton Ohio. Florida May 16-18, 1967.
- 6-United States Patent 4,026,313. Zeigler may 31, 1977.
- 7-United States Patent 3,000,386. J. H. Schulze et al sept. 19, 1961.
- 8-International Patent WO84/01094. Nodskov sept. 24, 1983.
- 9-United States Patent 3,486,279. j. Webb dec. 30. 1969.
- 10- Building Systems Design Group "Design and Development of a Building System for and Exhibition Space" Report MIT, fall 1985.
- 11-Building System Design Group "Space Station Workshop" Report MIT, fall 1986.
- 12- Mario Salvadori "Structure In Architecture" Prentice-hall international, inc. New Jersey, 1963.
- 13-Ludwig Glaeser "The Work of Frei Otto" The Museum of Modern art, New York, 1972.
- 14- Frei Otto "Naturliche Konstruktionen" Deutsche Verlags-anstalt, Stuttgart, 1982.
- 15- United States Patent 3,325,958. A. B. Moore, June 20, 1967.
- 16-John M. Hedgepeth & Louis R. Adams " Design Concepts for large Reflector Antenna Structures" NASA contractor report 3663, 1983
- 17- Technical support package "Deployable Geodesic Truss" NASA lar-13113 Langley Research Center.

- 18- Frei Otto "Tensile Structure" MIT press, Cambridge, Mass. 1979.
- 19- Marks "Dymaxion World of Buckminster Fuller" Reinhold Publishers, New York, 1960.
- 20- R. B. Fuller "Inventions" St. Martin's press, New York, 1983.
- 21- Felix Escrig "Estructuras Espaciales de Barra Desplegables" Informes de la Construcción, Vol 36, #365, noviembre 1984.
- 22- United States Patent 3501876, W. H. Engle, "Modular Structure" March 24, 1970.
- 23- United States Patent 3362118 A. Brunner, "Expansible Surface Structure" Jan. 9, 1968.
- 24- Technical support package "Explosive Welding For Remote Applications" NASA lar-13119 Langley Research Center.
- 25- Technical support package "Synchronously Deployable Truss" NASA lar-13117 Langley Research Center.
- 26- NASA Tech Brief "Synchronously Deployable Truss" summer 1984/ B84-10350/ NASA lar-13117 Langley Research Center.
- 27- NASA Tech Brief "Synchronously Deployable Truss" July/August 1986, NASA lar-13490 Langley Research Center.
- 28- Mc Donald Schetky, "Shape-Memory Alloys" Scientific America, Vol 24, #5, pp. 74-84. November 1979.
- 29- M. L. Clevert "Portable Bridge Design comes down to earth" ENR pp. 34, August 22, 1985.
- 30- Astro Research Corporation "Information Cataloge" 1979.
- 31- Dornier Systems "Extendable and Retractable Mast" information cataloge.
- 32- Felix Escrig. "Expandable Space Frame Structures" Third International Conference of Space Structures, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984. pp. 845-850
- 33- Oscar Sircovich Saar "Self-Erecting Two Layer Steel Prefabricated Arch" Third International Conference of Space Structures, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984. pp. 823-827.
- 34- R. C. Clarke "The Kinematic of a Novel Deployable Space Structure System" Third International Conference of Space Structures, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984. pp. 820-822.
- 35- J. F. Gabriel "A Space-Frame Building System For Housing" Third International Conference of Space Structures, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984. pp. 1052-1057.
- 36- Hugo F. Verheyen "Expandable Polyhedral Structures Based on Dipolygonios" Third International Conference of Space Structures, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984. pp. 88-93.
- 37- Mark A. Bresh "Combining Space Frame and Fabric Structures" Third International Conference of Space Structures, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984. pp. 851-854.
- 38- R. B. Haber, Lloyd Tuner, Others. "Air-Supported Forming" Concrete International, pp. 13-69. January 1986.
- 39- B. Metioni. "Tomorrow's Manufacturing Facilities, Design of a Car Assembly Plant for the 21st century" Tesis, MIT, 1987.
- 40- Cree "Stores Et Toiles" Logements 88/ les fifies, Architecture Intérieure, juin/juillet 88, Société d'édition de Presse.
- 41- F. Escrig, P. Valcarcel. "Curved Expandable Grids" Non-Conventional Structure Proceedings, pp. 157-166. London 1987.
- 42- E. Perez Piñero "Structures Réticulées". L'Architecture d'aujourd'hui, Vol. 141, December 1968. pp. 76-81.
- 43- C. Henrique Hernandez "Deployable Structures" Tesis, MIT. 1987.
- 44- F. Escrig, P. Valcarcel. "Estructuras Espaciales Desplegables Curvas" Informes de la Construcción, Vol. 39, Nº 393, enero/febrero 1988.