

Factibilidad constructiva de cubiertas plegables de láminas delgadas

M Sc. Carlos H. Hernández
IDEC/FAU/UCV

Resumen

En este trabajo se estudia la factibilidad constructiva de producir un módulo de cubierta transformable de láminas rígidas con capacidad para soportar cargas por sí misma, como un paso hacia la combinación de cubiertas metálicas con sistemas estructurales transformables de barras. Para ello se desarrolla una Cubierta Plegable de Láminas de Aluminio donde el componente estructural es a su vez la membrana de protección. Se utiliza la capacidad portante que adquieren las láminas delgadas cuando se doblan en determinadas geometrías para asumir los compromisos estructurales. De igual forma se utiliza la geometría de la lámina para lograr la estanqueidad de la cubierta, sin necesidad de compuestos sellantes o juntas flexibles y se demuestra la factibilidad técnica de la utilización de láminas delgadas para la construcción de cubiertas transformables donde la lámina asume los compromisos estructurales.

Abstract

In this essay, we study the construction feasibility of producing a module with a transformable cover made of rigid plates able to support freights. This is a step towards the combination of metal covers together with transformable structural bar systems. A pliable cover, whose structural component is the protection membrane as well, is being developed. The carrying capability that thin plates acquire when folded in a specific geometric form is also used in order to face the structural demands. At the same time, the geometry of the plate is used to obtain the cover's watertightness, with no need of sealer components or pliable junctures. It is also demonstrated the technical feasibility of thin plates for the construction of transformable covers in which the plates face the structural demands.

Cuando se trabaja con estructuras transformables de barras, donde la estructura resultante es una malla permeable, es necesaria la adición de una membrana que complemente la cubierta. En la mayoría de los casos se utilizan membranas textiles por su ligereza y por la posibilidad que tienen de plegarse junto con la malla. Para estructuras de ciclos de uso cortos ésta es una solución adecuada, en cambio, cuando se trata de estructuras permanentes, el uso de materiales de mayor duración en la membrana de cerramiento ampliaría el campo de aplicación de estas estructuras.

Varios autores han propuesto la idea de incorporar láminas rígidas a mallas estructurales transformables (cf. Pérez Valcárcel, en *Arquitectura transformable*, 1993; Hoberman, 1992, pp. 35-53; Pérez Piñero, 1992). Entre ellos cabe destacar al arquitecto Emilio Piñero en su desarrollo de una "vidriera hipercúbica desplegable": un sistema que combina una malla estructural transformable con láminas de vidrio que se pliegan en conjunto, partiendo desde una superficie plana hasta una forma cúbica.

Por otra parte, si a estas membranas rígidas se les imprimen ciertas cualidades ellas pueden desempeñar funciones estructurales y pueden cubrir luces sin la necesidad de elementos estructurales adicionales (Engel, 1979, pp. 143-231). Estas superficies estructurales pueden construirse de manera que sean, en sí mismas, estructuras transformables. En este trabajo se estudian estas posibilidades a través del diseño de una cubierta transformable de láminas delgadas.

Descriptores:

Cubiertas transformables; Conexiones móviles.

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 19-II, 2003, pp. 23-41.
Recibido el 16/12/02 - Aceptado el 15/03/03

Se desarrolla una Cubierta Plegable de Láminas de Aluminio donde el componente estructural es a su vez la membrana de protección. Se utiliza la capacidad portante que adquieren las láminas delgadas cuando se doblan en determinadas geometrías para asumir los compromisos estructurales. De igual forma se utiliza la geometría de la lámina para lograr la estanqueidad de la cubierta, sin necesidad de compuestos sellantes o juntas flexibles. Se demuestra la factibilidad técnica de la utilización de láminas delgadas para la construcción de cubiertas transformables donde la lámina asume los compromisos estructurales.

Se diseña una cubierta de 853 m² conformada por seis módulos independientes de 24 m de longitud x 5,56 m de ancho. Cada módulo se pliega desde una dimensión inicial de 24 m, hasta una posición final de 4,60 m (figuras 2 y 3) utilizando un sistema de guayas de arrastre accionadas por un motor. La geometría escogida produce un movimiento oscilante durante los procesos de pliegue y despliegue y, para contrarrestarlo, se desarrolla un sistema de arrastre y de guías capaces de absorber movimientos de rotación dentro del movimiento de desplazamiento de las láminas.

Se desarrollan así mismo dos tipos de juntas móviles: una, para las aristas altas, provista de una bisagra continua tipo engranaje que a su vez produce una junta estanca; otra para las aristas bajas, provista de bisagras independientes, logra la estanqueidad a través de una canal generada por un doblez en la lámina que guía las aguas fuera de la junta.

Objetivo

Estudiar la factibilidad constructiva de producir un módulo de cubierta transformable de láminas rígidas con capacidad para soportar cargas por sí misma, como un paso hacia la combinación de cubiertas metálicas con sistemas estructurales transformables de barras.

Alcance

El alcance del presente trabajo es diseñar, construir y ensayar un módulo de cubierta donde se resuelvan los siguientes problemas:

- Dar capacidad estructural a láminas delgadas para cubrir luces específicas.
- Diseñar juntas que permitan la movilidad, que a su vez sean estancas y permitan la transmisión de los esfuerzos.
- Estudiar el proceso de plegado para la geometría escogida.

Antecedentes

Entre los autores que han abordado este tema se cuenta el arquitecto español Emilio Pérez Piñero (1992, p. 26) quien en los años setenta diseñó para el pintor Salvador Dalí un vitral plegable, formado por 84 láminas de vidrio de 1 m x 1 m montadas sobre una malla estructural plegable basada en una geometría cúbica (ver figuras 4 y

Figura 1
Detalle techo.
Foto de C.H.
Hernández.

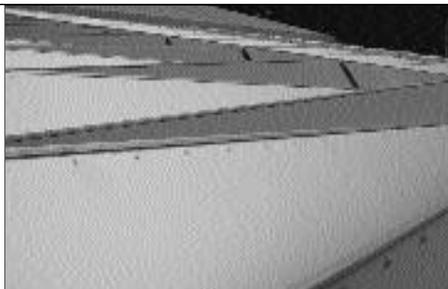


Figura 3
Maqueta
techo plegado.



Figura 2
Maqueta
techo plegado.

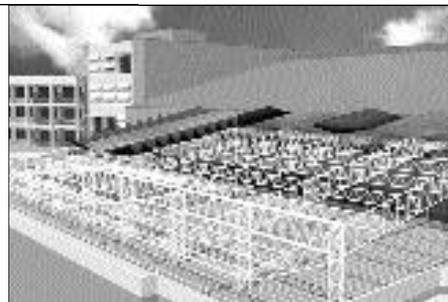


Figura 4
Vidriera
hipercúbica.
Piñero, 1992, p. 26.



5). Esta es una de las primeras propuestas donde se muestra la posibilidad de una cubierta rígida integrada a la estructura transformable. Pérez Piñero proponía lograr la impermeabilización colocando un textil previa o posteriormente o con láminas metálicas montadas con la estructura abierta.

Más recientemente Pérez Valcárcel (1993, p. 150), quien estudia este tipo de cubiertas de láminas rígidas, estableció que hay tres estrategias para combinar elementos rígidos con las mallas transformables. La primera es colocar las láminas una vez desplegada la estructura; la segunda es colocarlas en un punto intermedio del proceso de despliegue, cuando el acceso es más fácil ya que la estructura no ha comenzado a elevarse (sistemas de tijera para bóvedas y cúpulas). La tercera estrategia consiste en que las láminas se plieguen junto con la malla. En este último caso estudia diferentes sistemas de malla encontrando que los más adecuados son los sistemas más regulares como las mallas planas o cilíndricas con un módulo cuadrado. Las mallas trianguladas también se pueden utilizar pero tienen el inconveniente de que por incompatibilidades geométricas en las diferentes etapas de

la transformación la malla no puede plegarse por completo. El trabajo de Pérez Valcárcel muestra algunas propuestas teóricas (ver figura 6) pero, a diferencia de Pérez Piñero, en éstas no hay una propuesta constructiva.

Otra propuesta es la del ingeniero Charles Hoberman (1992) quien plantea un sistema de techos que denomina *Techo Retráctil Iris*, debido a que el sistema se inspira en el funcionamiento del ojo humano. En este caso, un conjunto de láminas rígidas fijas sobre una estructura transformable se mueven con la estructura hacia el centro del círculo que define el apoyo de ésta, produciéndose una expansión radial (Robbin, 1996) (cf. figura 7). La figura 8 muestra otra propuesta de Hoberman: se trata de una concha que utiliza el sistema de tijeras para la malla transformable, la cual lleva incorporados paneles rígidos. En ninguno de los casos se llega a desarrollar la fase constructiva.

Hoberman trabaja también en estructuras de planos plegados como se muestra en la figura 9, donde con láminas de cartón plegado se pueden obtener refugios estables. Otras propuestas de este tipo las presentan Sim der Ryn y Stanford Hirshen, quienes desarrollan viviendas plegables para trabajadores migratorios en

Figura 5
Vidriera desplegada.
Piñero, 1992, p. 13.

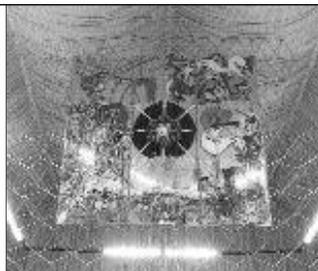


Figura 6
J.P. Valcárcel,
en *Arquitectura transformable*,
1993.

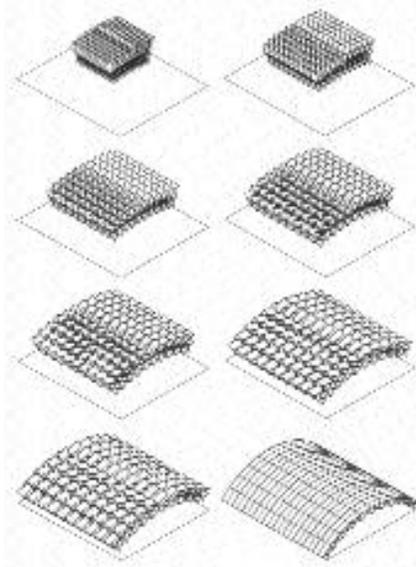


Figura 7
Domo Iris.
Hoberman,
1992.

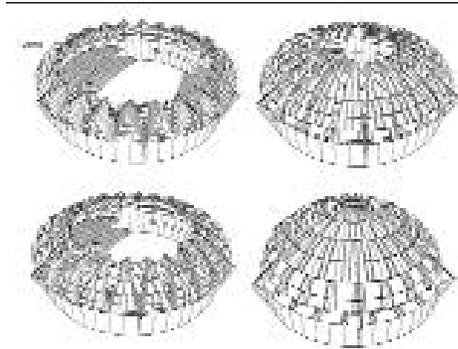
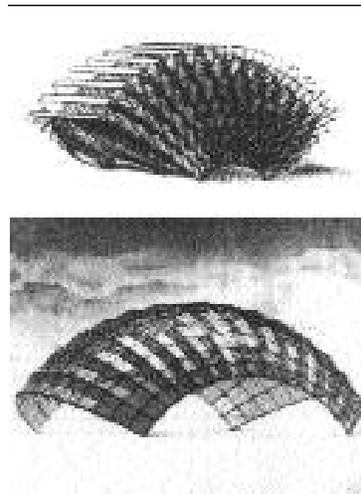


Figura 8
Concha plegable.
Hoberman, 1992



California, construcciones realizadas en láminas predo-
bladas de poliuretano de 9 mm (figura 10). Otro ejem-
plo de este sistema es un refugio en forma de domo có-
nico diseñado por B. Benjamín el cual, a diferencia de
las propuestas anteriores, muestra estructuras con pa-
neles de poliuretano unidos con una cinta flexible con la
que se crea la junta (figura 11). La figura 12 muestra dos
conceptos desarrollados por la International Structures
Inc.: se trata de pequeñas estructuras tipo acordeón he-
chas de láminas de espuma de poliuretano y reforzadas
con teipe aluminizado.

Otra propuesta la hace Koryo Miura del Instituto
de Ciencias Aeroespaciales de Japón, al combinar sofis-
ticados métodos matemáticos con el milenario arte de
Origami y desarrollar un sistema desplegable plano
–concebido para un colector de energía solar en el es-
pacio– que se caracteriza por tener dos acordeones en
la misma superficie, lo que le permite desplegarse en
dos direcciones al tirar diagonalmente pero cuya super-
ficie, una vez desplegada, no tiene tendencia de repl-
garse debido a la presión que ejercen los mismos planos
entre sí (figura 13).

Figura 9
Refugios de
cartón. Hoberman,
1992.

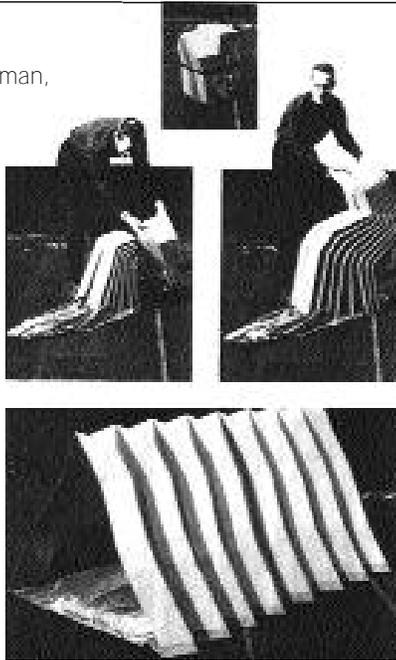


Figura 11
Domo plegable. B. Benjamín, en Hernández, 1987.

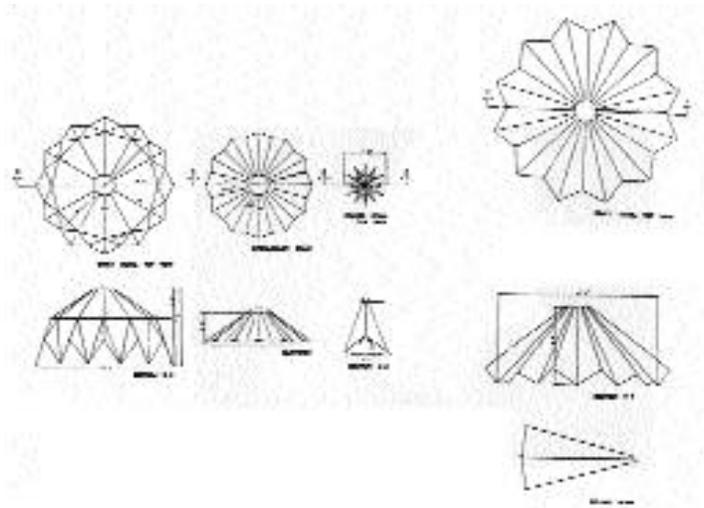


Figura 10
Refugio plegable. Sim Der Ryn, en Hernández, 1987.

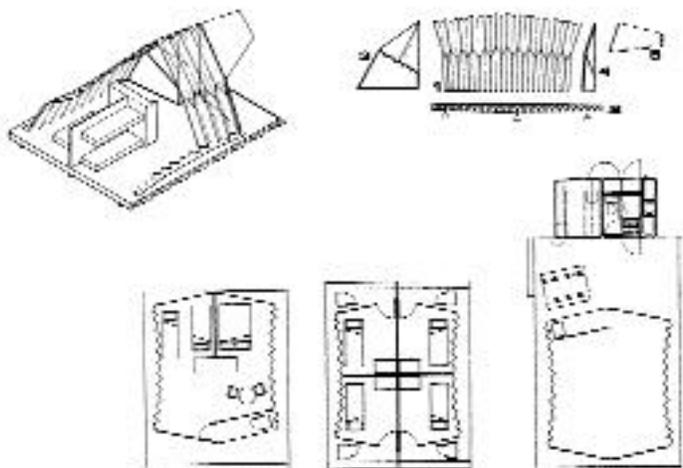
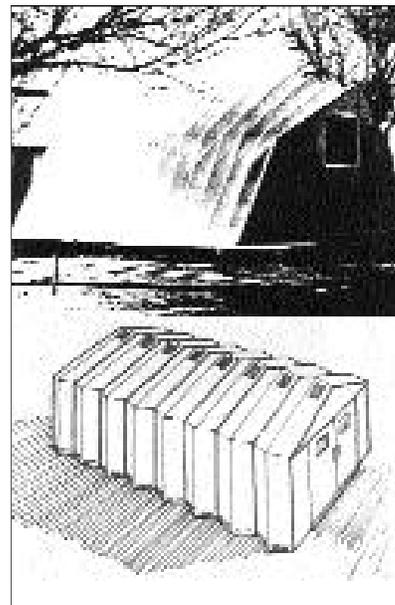


Figura 12
Refugio
plegable, en
Hernández,
1987.



En relación con la capacidad estructural de los techos de lámina Koryo Miura realizó un trabajo de construcción de un techo que cubre una luz de tres metros sin necesidad de elementos estructurales adicionales a las propias láminas (figura 14). Para ello utilizó láminas galvanizadas C20 (0 mm), las cuales se plegaron en una dirección formando una canal baja y un solape en la cumbre. Las secciones se conectan entre sí sólo en algunos puntos del solape y se alejan una de la otra con secciones de tubo para permitir el paso de luz y el escape del aire caliente (figura 15).

Propuesta

En el año 1998 se determinó que el edificio sede del Centro Internacional de Educación y Desarrollo-CIED, localizado en la Urbanización Las Esmeraldas en Caracas, requería de una cubierta para el área de terraza y piscina, pero ésta no podía tener carácter permanente debido a que las ordenanzas municipales no lo permitían. Se hicieron varias propuestas de cubiertas transformables, con elementos textiles y con láminas metálicas, resultando seleccionadas estas últimas en gran medida debido al factor durabilidad de la lámina metálica.

Se requería cubrir un área de 853 m² condicionada a la utilización de una estructura existente en el área a cubrir conformada por siete cerchas paralelas de acero de 20 m de longitud separadas 5,5 m entre ellas (figura 16).

La cubierta diseñada consiste en seis módulos independientes de 24 m de longitud x 5,56 m de ancho, que utilizan como soporte las cerchas de acero existentes añadiéndoles una extensión para cubrir la totalidad del área. Cada módulo está conformado por 33 pares de láminas trapezoidales de aluminio, en cuya posición desplegada forman prismas cónicos que se alternan para generar un movimiento geométrico en el techo (figura 17).

Estos conjuntos de láminas se pliegan en forma de acordeón en un mismo sentido, desde una dimensión inicial de 24 m hasta un ancho final de 4,60 m. Las láminas se apoyan sobre ruedas que se desplazan sobre un riel que actúa también como canal. Para impulsar el movimiento de los módulos se utiliza un sistema de guayas de arrastre accionadas por un motor que se ubica detrás de la pantalla de la fachada del edificio (figura 18 y 19).

Desarrollo

Los tres problemas fundamentales de diseño a resolver fueron los siguientes:

1. Dar capacidad estructural a la cubierta con elementos muy livianos.
2. Investigar cómo producir el movimiento de transformación.
3. Desarrollar conexiones móviles para permitir el plegado de la cubierta, la transmisión de los esfuerzos y a la vez la estanqueidad de la junta.

Figura 13
Panel desplegable.
Koryo Miura, en
Robbin, 1996.

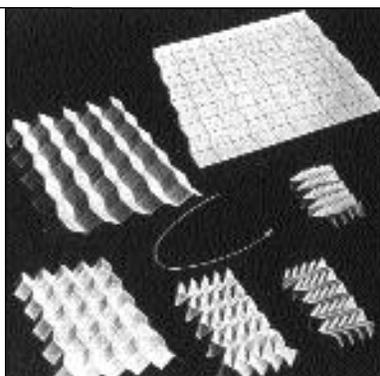


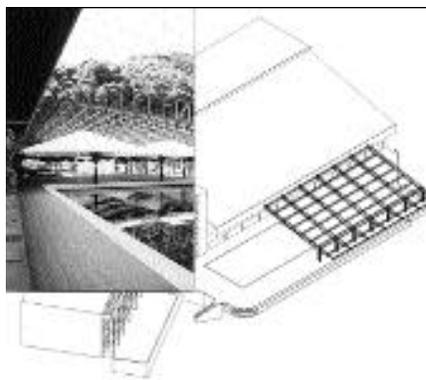
Figura 14
Techo de Láminas plegadas,
vista arriba.



Figura 15
Techo de láminas
plegadas,
vista inferior.



Figura 16
Estado de la
terracea del
Edificio Sede del
CIED antes de la
intervención.



Estos problemas, todos vinculados entre sí, se revisan a continuación de forma separada sólo para simplificar su descripción.

Estructura y geometría

Para lograr un techo muy liviano se partió de la idea de utilizar láminas delgadas planas que, como "una hoja de papel", son incapaces de cubrir una luz por pequeña que ésta sea, pero que logran una rigidez asombrosa cuando se le producen plegaduras. Jugando con la altura del plegado y el espesor del material se pueden cubrir diferentes luces (figura 20).

Si al material se le hacen pliegues en un solo sentido sucede que, en el sentido perpendicular a éstos, la resistencia es mucho menor y con poca fuerza, por ende tenderá a plegarse y de esta forma obtendremos un acordeón.

Hay infinidad de combinaciones de dobleces que permiten obtener láminas muy rígidas en un sentido y plegarse como acordeones en el sentido contrario.

En el caso de una hoja de papel o cartón, las juntas móviles son formadas por el mismo material; en el caso de láminas metálicas se requiere de juntas mecánicas (bisagras) en cada arista.

En nuestro caso se exploró una combinación con el menor número de aristas, la máxima altura de plegado y el máximo aprovechamiento de la lámina.

Se utilizó una lámina de aluminio para reducir el peso de la cubierta y procurar un mínimo mantenimiento. En experiencias anteriores (techo de láminas, casa C. Hernández) se había trabajado con láminas galvanizadas de 0,6 mm para luces similares pero, por ser el aluminio un material con menor módulo de elasticidad que el acero y dado que el conjunto sería sometido a cargas y deformaciones cinéticas, se optó por utilizar láminas de aluminio de 1,6 mm de espesor.

Las láminas comerciales se producen en bobinas con un ancho de 1,22 m; la longitud está limitada sólo por las máquinas de corte y de doblaje. En este caso, se utilizaron piezas continuas de 5,56 m de longitud.

Se estudió una combinación entre geometría y dimensiones de los componentes para aprovechar la lámina al máximo (mínimo desperdicio) y a la vez obtener el máximo de altura al ensamblar el conjunto.

La geometría escogida fue la resultante de la combinación de un prisma cónico que se origina al extruir un triángulo equilátero de mayor dimensión hacia uno de menor dimensión separados entre sí 5,56 m. La relación de altura entre los triángulos equiláteros se determinó equilibrando el aspecto formal de la cubierta, la altura promedio del doblé y el efecto de ésta sobre la cinemática de la cubierta, obteniéndose una relación de 2:1 (figura 21).

El resultado de la combinación de los prismas cónicos se puede apreciar en el conjunto (ver figura 22) que

Figura 17
Vista desde el techo. Prismas Cónicos.

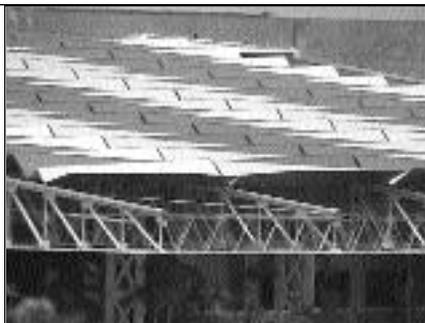


Figura 19
Vista general arriba.



Figura 18
Vista general lateral.



Figura 20
Al doblar las láminas delgadas se logra una resistencia.



es una sucesión de secciones de rombos que se desplazan de fila en fila, efecto que se acentúa pintando la mitad de los prismas de azul (color distintivo de la empresa); la otra mitad de las láminas fueron anodizadas y mantienen su color natural para obtener un acabado plateado mate.

Cada prisma está formado por dos tipos de láminas que se producen al realizar un corte diagonal sobre la lámina de 1,22 m x 5,56 m (figura 23). Una de las láminas recibe adicionalmente un "doblez" en uno de los extremos, el cual, dependiendo de la ubicación de la lámina en el conjunto, puede ir a la izquierda o a la derecha (hay un número igual de láminas con "doblez" en cada sentido) (figura 24).

A las láminas, en su borde superior, se les fija una bisagra continua formada por dos perfiles de aluminio con remaches de golpe de $\text{Ø}1/8$ " colocados cada 103 mm. Esto refuerza los dos bordes superiores de las láminas que no tienen dobléz y por consiguiente no tienen mayor resistencia al pandeo.

En el extremo inferior de la lámina sin "doblez" se fija el perfil de aluminio que corre de manera continua en todo el borde de la lámina y se fija con remaches de golpe de $\text{Ø}1/4$ " cada 103 mm, con la misma finalidad que en el borde superior. Sobre este refuerzo se fijan las bisagras inferiores.

Juntas y estanqueidad

Uno de los problemas fundamentales en el diseño de una cubierta rígida transformable se origina por el hecho de que la superficie de cubierta está formada por numerosos componentes relativamente pequeños articulados entre sí. ¿Cómo hacer entonces que la cubierta sea estanca pero permitiendo a la vez la articulación que la transforma?

Una de las primeras ideas fue la posibilidad de utilizar materiales flexibles (goma, membranas textiles, gomas de silicona, láminas delgadas de metal, etc.) que permitieran la movilidad de la junta y a la vez producir una junta cerrada que impidiese el paso del agua. Pero estos materiales no transmiten adecuadamente los esfuerzos entre los diferentes componentes de la cubierta por lo que no se produce un comportamiento estructural de conjunto. Por otro lado, este tipo de juntas tienden a fatigarse con el uso repetido y, en el caso de las gomas o materiales plásticos, la radiación UV rompe los enlaces poliméricos acelerando aún más el proceso de fatiga del material. Esto derivó al uso de bisagras rígidas para permitir la transmisión de los esfuerzos y realizar los movimientos entre láminas. La estanqueidad se logra con dobleces en la misma lámina que generan solapes y canales cuando el

Figura 21
Unidad básica del techo.



Figura 23
Corte diagonal de la lámina.

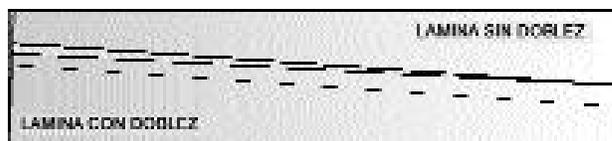


Figura 22
Combinación de prismas cónicos.

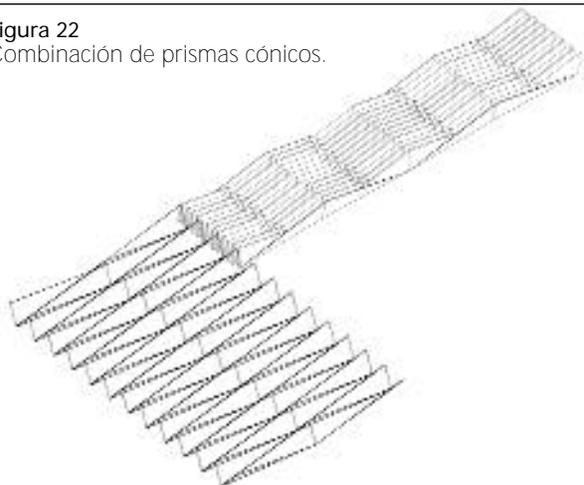


Figura 24
Lámina con dobléz.



conjunto de láminas está desplegado y dirigen de las aguas hacia los lugares de recolección. Al estudiar las bisagras se encontró una solución ingeniosa con una bisagra que se produce con dos perfiles de aluminio cuyo borde es la sección de un engranaje y en la cual, a diferencia de la mayoría de las bisagras, el efecto no se produce por rotación.

Esta bisagra sólo pudo utilizarse en la juntas de cumbrera dado que en las juntas inferiores el polvo y los sedimentos acumulados afectarían el mecanismo; en todo caso, la junta colocada en forma invertida no es estanca.

En las juntas inferiores un doblé de 10 cm (figura 26) en una de las láminas produce una canal en posición desplegada con capacidad para recoger el agua de las dos láminas adyacentes bajo precipitaciones de 400 mm/m². Las bisagras están separadas del fondo de la canal por un perfil de aluminio en "L", para evitar que el polvo penetre el mecanismo de la bisagra y que ésta no represe la salida del agua y de los sedimentos acumulados.

Estas canales inferiores arrojan el agua lateralmente sobre un canal que recorre perpendicularmente las láminas recogiendo el agua y arrojándola fuera del área cubierta. Las bisagras inferiores se fabrican a partir de segmentos de 60 mm de un perfil de aluminio que se maquina para obtener la bisagra.

Las bisagras se unen con un eje de acero inoxidable que se fija con un retén. Entre el eje y la bisagra de aluminio se colocan bocinas de nylon grafitado que reducen la fricción, el desgaste del aluminio y el par galvánico que podría formarse entre el eje de acero y el aluminio. De igual forma se colocan dos arandelas de nylon grafitadas para evitar el contacto entre las caras de los componentes de aluminio.

El movimiento

Al utilizarse un sistema de plegado cónico, sólo las aristas superiores de la cubierta son paralelas. Las aristas inferiores forman un ángulo entre ellas provocando que el movimiento –durante el proceso de plegado o desplegado– sea de rotación sobre el punto de intersección (f) de los ejes imaginarios que se obtienen al prolongar las aristas fuera de las láminas. Esto conduce a que el extremo más cercano al eje de rotación recorra una menor distancia que el extremo más alejado. Estas longitudes diferentes de recorrido se alternan en el plegamiento del siguiente par de láminas, donde el punto de giro cambia de signo de manera que el extremo que antes recorrió una menor distancia ahora recorrerá la mayor. El resultado es un movimiento de oscilación (figuras 27 y 28) donde hay desplazamientos laterales en los apoyos que deben ser absorbidos necesariamente por el canal guía. Los cambios de velocidad en los extremos opuestos de cada par de láminas deben ser absorbidos por el mecanismo de arrastre.

El movimiento de las láminas se efectúa usando un sistema de dos cables que se mueven alternadamente en sentido opuesto para halar o empujar el primer par de láminas de cada conjunto, y éstas, a su vez, "halan" las otras láminas utilizando los cables perimetrales de restricción, o empujan utilizando los topes (figura 29) colocados en el borde inferior de la canal de las láminas. Ambos cables parten de un tambor (1), accionado por un motor DC reversible con caja reductora. Uno de los cables entra por la cara superior del tambor mientras que el otro sale por la inferior, de manera que si el motor gira a la derecha uno de ellos será recogido mientras que el otro será

Figura 25

Bisagra de cumbrera.

1. Remaches. 2 Perfil de cierre. 3 Perfil tipo engranaje Izq. 4 Perfil tipo engranaje Der. 5 Lámina A-D Funcionamiento.

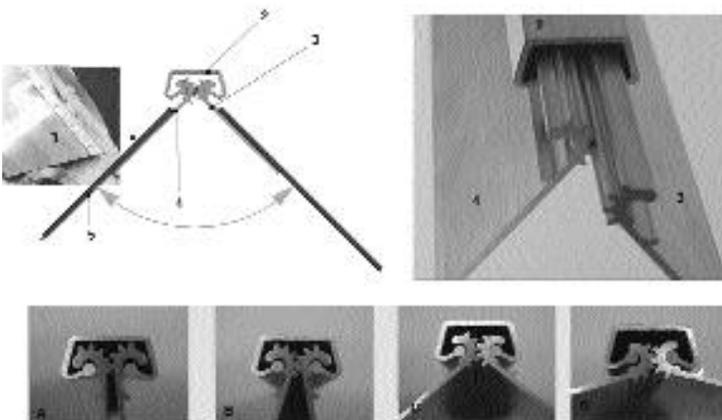
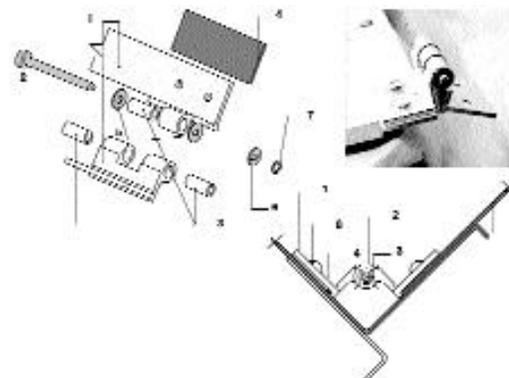


Figura 26

Bisagra inferior.

- 1 Perfil de bisagra. 2 Eje Inoxidable. 3 Bocinas de nylon. 4 Pletina de refuerzo. 5 Arandelas de nylon. 6 Arandela inoxidable. 7 Retén. 8 Remache de golpe.



liberado; cuando el motor gira en sentido contrario –a la izquierda– se alternarán los cables que son recogidos o liberados. Los cables salen del tambor (colocado detrás de la pantalla de la fachada del edificio) y suben hasta colocarse dentro de la canal de aluminio cambiando para ello de dirección dos veces en las poleas (2 y 3). Uno de los cables continúa hasta el final de la canal donde se regresa sobre la polea de retorno (4). Ambos cables se encuentran en la primera polea de arrastre (5) fija sobre el apoyo del primer par de láminas, cambian de dirección y se dirigen hacia la segunda polea de arrastre (6) ubicada en el extremo opuesto de este primer par de láminas, de allí toman direcciones opuestas para fijarse una en un punto fijo (7) en el extremo de una segunda canal y la otra hacia un contrapeso de compensación (8) fijo a la pared (figura 30).

Este sistema permite absorber las variaciones de velocidad al desplazarse las poleas de arrastre sobre los cables, ajustando las diferencias de recorrido entre cada extremo. Cuando el sistema arranca ambas poleas A y B (figura 31) se mueven a la misma velocidad hasta que la polea A, colocada en el extremo corto del prisma ($L_a = L_b/2$) topa con la siguiente lámina en un tiempo $t/2$ antes que B, ya que el recorrido de B es el doble que el de A. Cuando esto ocurre, la polea A tiene que mover la siguiente lámina, lo cual suma peso (roce) a A; en este momento A se mueve más lentamente que B, quien mantiene su velocidad inicial hasta que haga tope con la siguiente lámina siendo aquí donde las fuerzas se equilibran; A y B se mueven a igual velocidad hasta que, en este caso, B se tope con la siguiente lámina antes que A y el proceso se repita.

Figura 27
Esquema de plegado.

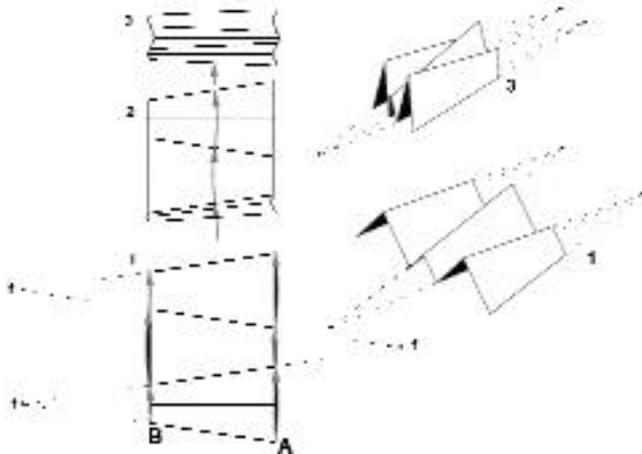


Figura 28
Esquema de plegado. Movimiento lateral.

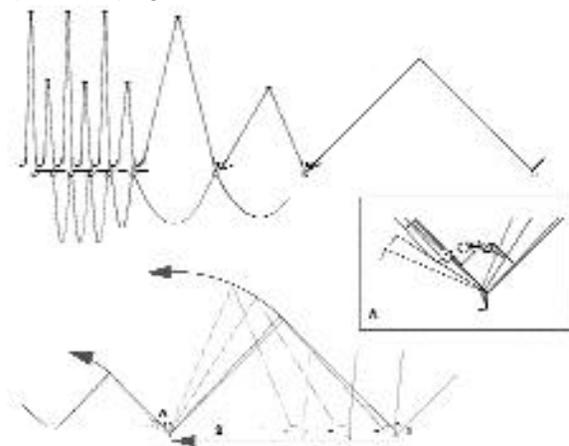
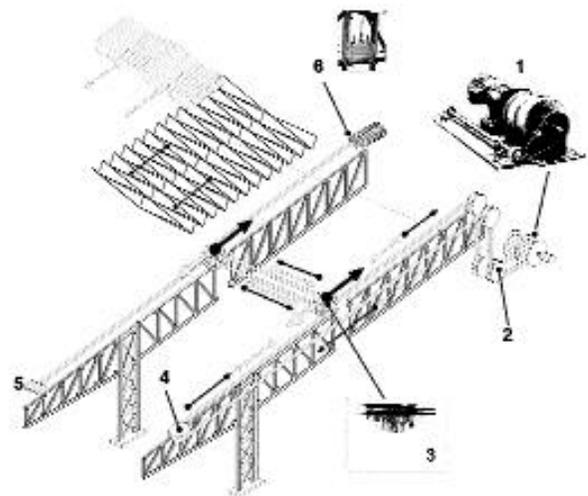


Figura 29
Vista (abajo).
Topes.

Figura 30
Esquema del sistema de arrastre.



El contrapeso permite compensar la diferencia de velocidad en las salidas de las guayas (figura 32) dado que se utiliza el mismo tambor para ambas guayas (salida y retorno). Tenemos una situación inicial donde una guaya está totalmente enrollada en el tambor mientras que la otra está totalmente afuera (la guaya totalmente enrollada requiere de tres capas sobre el tambor). Esto genera una diferencia en los diámetros sobre los que se enrollan o desenrollan las guayas. Por cada vuelta del motor la guaya que se enrolla se recogerá $L1=2 R1$ y la que se desenrolla saldrá $L2=2 R2$, donde $R1 < R2$ por lo que el contrapeso bajará recogiendo guaya del sistema para compensar la diferencia de longitud $L1 < L2$. En un punto intermedio $R1$ se hace igual a $R2$ por lo tanto no es necesaria ninguna compensación (el contrapeso no se mueve). Cuando se cubre la segunda capa de guaya sobre el tambor la situación se invierte $R1 > R2$ por lo que se recoge más guaya de lo que se desenrolla por tanto el contrapeso subirá aportando guaya al sistema.

El sistema motriz debía estar provisto de un sistema de control para establecer el principio y el final del re-

corrido de las láminas y de esta manera evitar que el motor continúe funcionando cuando las láminas llegan a su posición final o que el operador se equivoque en el sentido de operación (accidentes que podrían dañar gravemente el sistema). Después de revisar varios sistemas existentes en el mercado (sistemas electrónicos), se optó por uno mecánico más sencillo que tiene la ventaja de "recordar" siempre la posición del sistema no importando si ocurren fallas eléctricas. El sistema diseñado (figura 33) consiste en un tornillo sin fin milimétrico que se conecta al eje del motor a través de una cadena. Sobre el tornillo se coloca una pieza roscada que se desplaza sobre el tornillo a la izquierda o a la derecha dependiendo del sentido de rotación del motor; en las posiciones extremas se colocan dos *limiswiches* que al ser accionados por esta pieza cortan la corriente al motor (figura 34).

La guía de desplazamiento y de soporte de las láminas debía permitir los desplazamientos horizontales que se generan durante el pliegue y despliegue del conjunto, por ello se escogió como guía un canal abierto sobre el cual se mueven las ruedas que soportan la cubierta (figura 35).

Figura 31
Movimiento de las poleas.

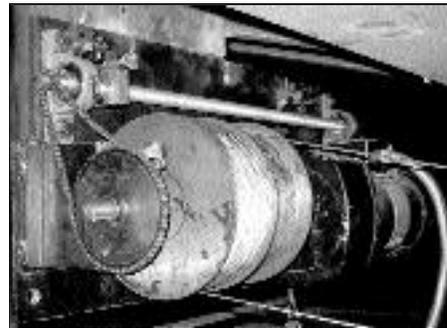
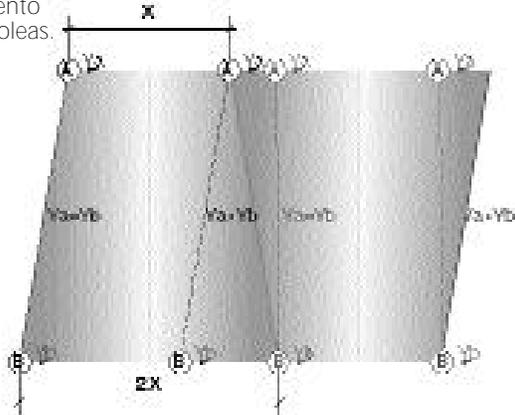


Figura 33
Motor y sistema de control

Figura 32
Contrapeso.

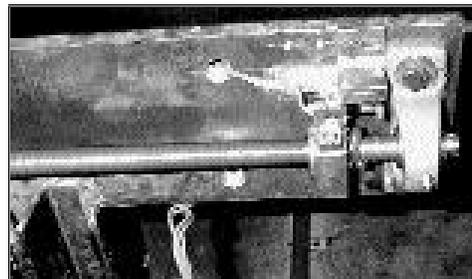
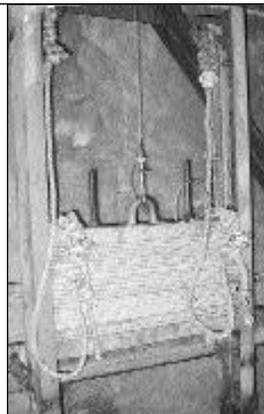


Figura 34
Limiswich.

Estas guías se encuentran a ambos lados de la canal de desagüe de las aguas de la cubierta, por lo que se diseñó un perfil de aluminio que asumiera ambos roles, riel-canal. Este perfil está formado por un canal central para el agua y dos canales laterales altos para la guía de los soportes de las láminas. Este perfil se sujeta al cordón superior de las cerchas que sirven de estructura base a la cubierta.

El apoyo de las láminas sobre el riel/canal se produce a través del componente (figura 36), que además de apoyo actúa como elemento de rodamiento y de restricción evitando que las láminas se levanten en caso de producirse succión o empuje desde abajo por efecto del viento. Este componente está conformado por una pieza que sirve de base, la cual se fija bajo las bisagras de cada extremo de las láminas. Utiliza en un lado los remaches que lo fijan a la bisagra y, en el otro lado, se fija a la lámina a través de remaches de cabeza cónica de manera que queden a ras de la lámina y no obstaculicen el movimiento de la segunda lámina al desplegarse. La rueda (3) es de acero inoxidable como todas las piezas de este componente, con bocina de bronce (4) como rodamiento. El eje (5) po-

see una cabeza que permite el paso de la guaya de 3/32" (6) que actúa como elemento de fijación entre la distancia que separa las láminas al desplegarse. Este cable se fija a través del tornillo de retención (8) que comprime el cable en la cabeza del eje evitando su desplazamiento. Este cable se coloca con la finalidad de evitar que los esfuerzos del despliegue del conjunto se transmitan a través de las láminas, siendo el encargado de arrastrar cada par consecutivo de láminas siguiendo el movimiento de la primera lámina que es la única movida directamente por el motor. Una vez ubicado este eje se fija con la pieza (2), la cual queda en posición al introducirle el pasador de resorte (9). Esta pieza permite el paso del cable de arrastre y está provista de un gancho soldado que evita el levantamiento de las láminas.

Proceso constructivo

La bisagra de la cumbrera se construye a partir de tres perfiles extruidos de aluminio que se cortan a la longitud requerida (figura 37). Estos perfiles se perforan y

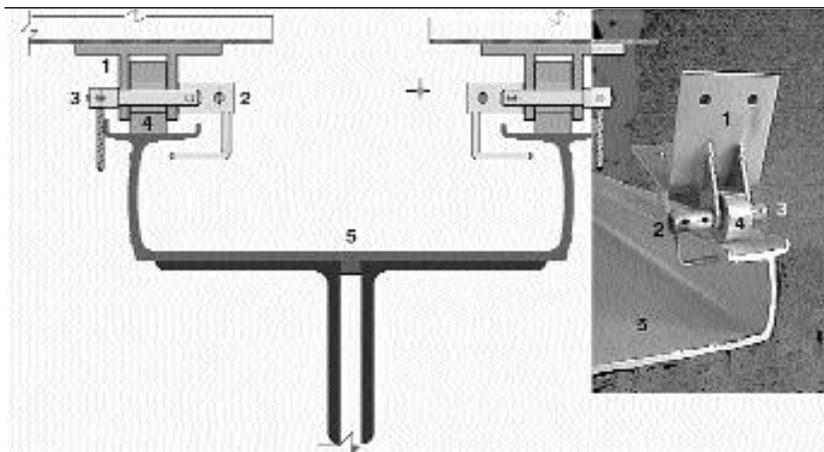


Figura 35
Canal-Riel.

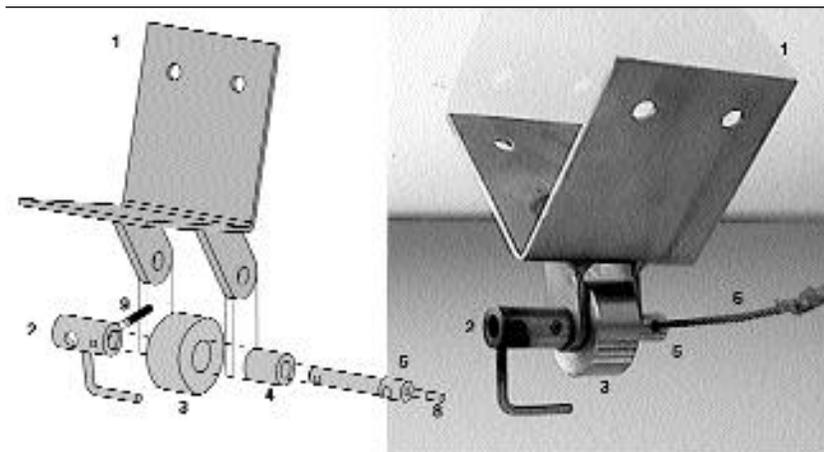


Figura 36
Soporte de láminas.

posteriormente se remachan sobre las láminas de aluminio. La bisagras inferiores se producen a partir de otro perfil extruido que posteriormente también se corta en trozos y se perfora. En el sitio del eje se coloca una bocina de nylon grafitada, producida a partir de un perfil cilíndrico, cortado y perforado. El eje se produce cortando varillas de acero inoxidable y torneándole el borde para producir una ranura donde se coloca el retén.

A partir de una bobina de lámina de aluminio las láminas se cortan en secciones de 5,56 m x 1,22 m mediante un corte diagonal y se obtienen los dos tipos de láminas requeridas: una de ellas recibe un doblez en un extremo y en el otro se remacha la bisagra de cumbrera (figura 38); la lámina sin doblez recibe en un borde la bisagra de cumbrera y en el otro una pletina de aluminio en el sitio de las bisagras inferiores no continuas (figura 39). Los perfiles se unen a las láminas a través de remaches macizos de aluminio golpeados con un martillo hidráulico. Una vez terminadas las láminas se tratan químicamente, primero con una base fuerte para limpieza y luego con cromato de sodio para abrir poros y permitir una buena adherencia de la pintura. Esta última se aplica y se seca en un horno para garantizar un acabado altamente resistente (figura 40). En el caso de las láminas anodizadas, éstas se deben anodizar antes de su perforación y remachado ya que este tratamiento químico corroe los remaches y ensancha los orificios de la lámina aflojando los elementos fijados a las mismas previo anodizado.

Las láminas se ensamblan en pares, conectándolas a través de la bisagra inferior; una vez ubicadas en su destino final se unen unas a otras por la bisagra de cumbrera donde las dos partes de la bisagra también se unen por un perfil que se desplaza entre los dos perfiles tipo engraje ya remachados a las láminas, de allí que, sin necesidad de elementos de fijación, se pueden unir las láminas en su posición final.

El canal riel es un perfil de aluminio extruido para el cual se diseñó una matriz especial. Los perfiles extruidos a seis metros de longitud se empataron durante el montaje para cubrir los 24 m de longitud de cada cercha.

Montaje

El primer paso del montaje fue la colocación de los canales riel sobre las cerchas de acero existentes. Especial cuidado mereció la alineación y el paralelismo de cada riel, los cuales debían mantener una distancia constante entre sí a pesar de las deformaciones de las cerchas. En la primera propuesta de diseño el riel se fijaba a través de aletas laterales, desechándose éstas ya que reducían la posibilidad de ajuste. Los canales se remacharon a las alas de las cerchas; la conexión entre los tramos de 6 m se reforzaba con una lámina de acero inoxidable colocada en la parte interna del canal. Se evitaron minuciosamente posibles "rebabas" o "escalones" en los canales de rodamientos. Los canales fueron rematados con un

Figura 37
Bisagra Superior

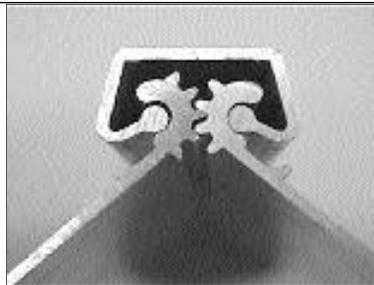


Figura 39
Bisagra inferior remachada con pletina de refuerzo.

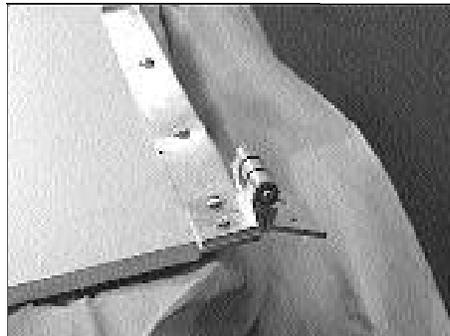


Figura 38
Remachado de la bisagra sobre la lámina.

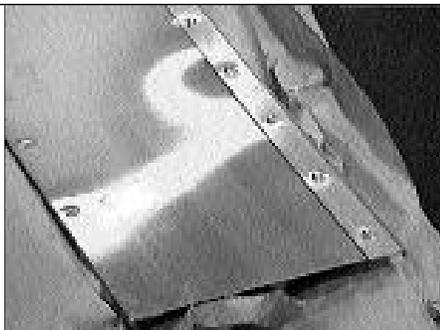
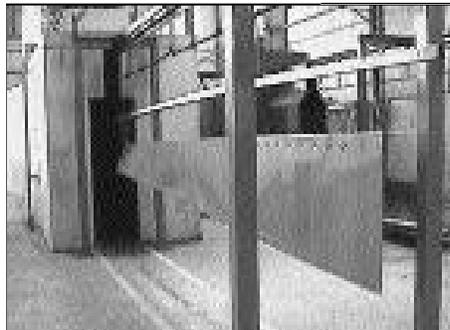


Figura 40
Pintado de láminas.



escurridor de acero inoxidable que pasa a través del soporte de las poleas de retorno y soldado a la cercha metálica (figura 41).

Los pares de láminas se elevaron y apoyaron sucesivamente sobre la canal-riel según su color y sentido del doblé (izquierdo o derecho), uniéndose por la cumbrera al introducir el perfil de conexión. Se dio inicio por las láminas conectadas a la fachada del edificio y desde allí, en descenso, hasta el extremo opuesto (figura 42). A medida que se ensamblaban las láminas se colocaba la guaya de retención para asegurar la correcta geometría del techo. Una vez colocadas las láminas se procedió a la instalación de las poleas y cables de arrastre que atraviesan una pantalla de concreto detrás de la cual existe un espacio de servicio de fácil acceso donde se ubicaron los conjuntos de motor: tambor, sistema de topes y contrapesos. Los contrapesos se construyeron con una "U" de acero que se desplaza dentro de un marco fijo a la estructura del edificio, desde el cual se suspenden planchas de acero hasta completar el peso requerido (150 kg) (figura 43). El marco posee un tope inferior al provisto de gomas que absorben el impacto del contrapeso en caso de ruptura de la guaya. Como medida adicional de seguridad se colocaron dos mecates de nylon con la medida requerida para frenar el contrapeso antes de tocar el tope, medida que se tomó en razón de que los contrapesos se encuentran ubicados sobre un cielorraso de cartón yeso bajo el cual existe circulación de personas (ver figura 32).

Comportamiento del prototipo

Una vez instalado el sistema motriz se procedió a mover el módulo, presentándose las situaciones que se describen a continuación por separado por razones de simplificación del presente análisis, pero que tienen todas un efecto de conjunto, siendo algunos problemas consecuencia de otros, y en razón de que las características y el tamaño del prototipo no permiten aislar cada factor para su evaluación por separado. Esta fue una experiencia realizada durante dos años de funcionamiento del sistema, período durante el cual se realizaron los ajustes que se describen a continuación.

1. Problemas geométricos

Como se vio anteriormente, las láminas para plegarse deben producir un movimiento de rotación a través de un movimiento de traslación donde los puntos de empuje (poleas de empuje) A y B deben moverse a diferentes velocidades (figura 27). Por otro lado, la arista de cumbrera se eleva al reducirse la base de los triángulos que se forman en los planos laterales del prisma (figura 28). Cuando el movimiento de un extremo del prisma no se produce a la velocidad adecuada (relación de la distancia a recorrer entre cada extremo 1:2), un extremo del prisma sube más que el otro, lo que rompe la relación geométrica y las láminas tienen que alabearse (cambia el ángulo de la arista de cumbrera). Dada su rigidez en el plano de la lámina se genera una fuerza dentro del sistema que tien-

Figura 41
Extremo de la canal, con soporte de la polea de retorno.

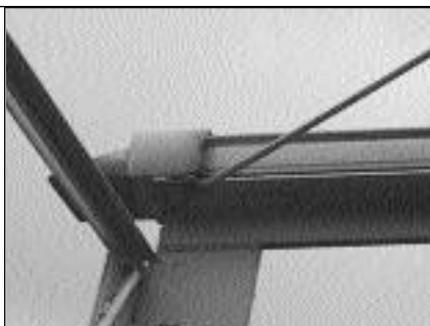


Figura 43
Tope contrapeso.



Figura 42
Vista de láminas ensambladas.



de a liberarse de otra forma. La forma deseada es frenando la polea de arrastre que va muy rápido, y esto hace que se regule la velocidad de las poleas y que el sistema de arrastre funcione. Hay otras dos maneras, no deseadas, de liberar la tensión interna. Estas son: por un lado, que las láminas se desplacen una respecto a la otra en la cumbrera, lo que es posible por el tipo de bisagra (esto se extenderá en el punto D sobre la bisagra superior); por otro, elevando uno de los puntos bajos del prisma, efecto que se potencia porque, siendo las aristas el eje de rotación teórico de las láminas, en la realidad es en la arista de cumbrera donde la bisagra hace rotación en el eje teórico, sin embargo en la bisagra inferior el eje de rotación real se desplaza del teórico (figura 44) debido al tipo de bisagra. Este desplazamiento genera una variación de la distancia entre la rueda y el eje de rotación de la bisagra, distancia que se acorta al plegarse las láminas; si esto no ocurre simultáneamente, en los extremos de la arista inferior uno de los extremos (el que se pliega más rápidamente) tenderá a levantar la rueda.

El elemento de retención que no estuvo concebido para soportar este efecto se dobla al elevarse la rueda por no ser capaz de soportar las cargas que se generan. Este elemento se reforzó para imprimirle capacidad de resistir estas fuerzas, sin embargo esto nos llevó a otro problema y es que, al no doblarse, el gancho ejercía presión contra

la canal generando suficiente roce para que estas ruedas rodaran más lentamente o se trabaran. La solución consistió en colocar cilindros de teflón en los ganchos, a manera de rodamiento, evitando así el contacto acero/aluminio, reducir el roce y permitir el desplazamiento fluido de las ruedas (figura 46).

Para que el sistema de arrastre funcione todo el conjunto de láminas debe someterse a estos efectos, los cuales van a ser controlados por los ganchos de las ruedas y los topes en las bisagras de cumbrera, pero si el sistema de arrastre no reacciona ante las primeras deformaciones, la fuerza dentro del conjunto se acumula hasta llegar a liberarse rompiendo un tope en la cumbrera o descarrilando los carros.

2. Primera Lámina o Lámina de Arrastre

Al ensayar el sistema se pudo observar que su comportamiento difería de la manera prevista en el proyecto. El contrapeso que debía compensar las diferencias de velocidad en la salida y entrada de las guayas no se movía de su posición inicial. Al revisar el peso y reducirlo, en un primer momento, el motor arrastraba el contrapeso pero no las láminas. Al aumentar el peso ligeramente tampoco se obtuvo resultado alguno. Por otra parte las guayas no se rompían, por lo que llevó a pensar que algún otro elemento dentro del sistema estaba absorbiendo las diferencias de longitud de las guayas (en las posi-

Figura 44 Gráfico de desplazamiento vertical.

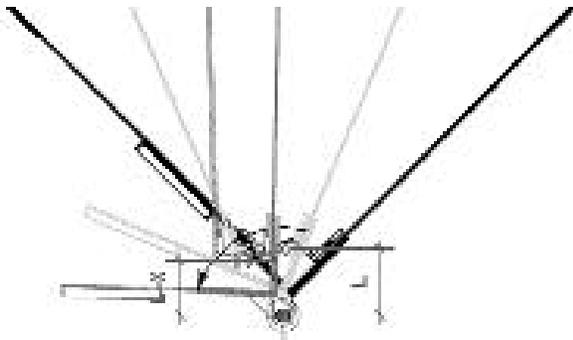
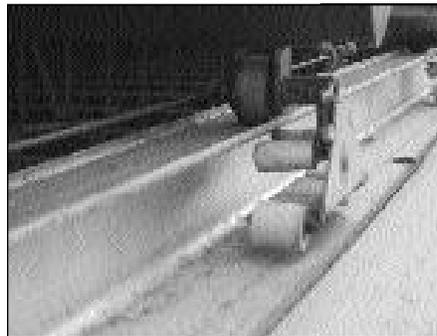


Figura 45 Gancho lateral.



Figura 46 Gancho lateral reforzado.



ciones extremas una guaya sale 20 cm más que la otra debido a la diferencia del diámetro del carrete por la acumulación de capas de guaya).

La primera lámina fue diseñada para soportar una carga axial que le produce el sistema de arrastre (máximo 200 kg.), permitiendo deformaciones que le otorgaban suficiente flexibilidad a la lámina para absorber en sí misma las diferencias de longitud de las guayas. Al deformarse los carros se cierran y se atascan por el roce con el riel o se descarrilan; por otro lado, el cambio de la geometría en la primera lámina (lámina de empuje) afecta el modo como se apoyan el resto de las láminas, generando un movimiento caótico en las primeras láminas y descarrillamiento de las ruedas.

La solución consistió en fabricar esta primera lámina lo suficientemente resistente para reducir su deformación: esto se logró fijando un tubo de aluminio de 100 mm x 100 mm en el ángulo inferior de la lámina y sobre ese tubo se fijó el soporte de las poleas de arrastre (figura 47). A partir de ese cambio el sistema comenzó a comportarse según proyecto: el contrapeso comenzó a descender en la primera mitad del recorrido ascendiendo en la segunda mitad. En tales condiciones, la presión axial dejó de ser absorbida por la lámina de arrastre, trasladándose a los carros.

3. El Sistema de Arrastre

El sistema de arrastre fue diseñado para trabajar con un motor DC a 90 Volt lo que permitía una velocidad de plegado de 8,5 m/min. El motor DC permite cambios en su velocidad variando el voltaje de alimentación, por tal motivo en el tablero fue instalado un reóstato (figura 48) para utilizarlo durante los ensayos, durante los cuales se detectó que, a velocidades bajas, el plegado de las láminas ocurría en una forma más organizada mientras que a velocidades altas (cerca de la velocidad de diseño) se

presentaba una mayor tendencia al desorden y, por tanto, a descarrillamientos. Al experimentar con variaciones de la velocidad (voltaje) y observar el comportamiento, se determinó un mejor funcionamiento del sistema entre 40-45 Volts. A voltajes menores se presentaban problemas con la fuerza del motor para arrastrar las láminas, no habiendo mayores variaciones en el comportamiento.

¿Cuál es la razón de este efecto a velocidades bajas? Debido a los roces y fuerzas internas del sistema las láminas no responden instantáneamente al activar el sistema. Si el movimiento de la lámina que ejerce el empuje es muy rápido topará con la siguiente antes de que esta última alcance la posición correcta, en consecuencia, el encaje entre ambas será incorrecto, afectando sucesivamente y en adelante todos los demás contactos entre láminas. Si se les otorga a las láminas el tiempo suficiente y necesario para llegar a la posición adecuada (antes de que la lámina de empuje efectúe el tope) se asegura el correcto ensamblaje.

Más adelante veremos cómo el efecto de la velocidad también está relacionado con el comportamiento de los carros.

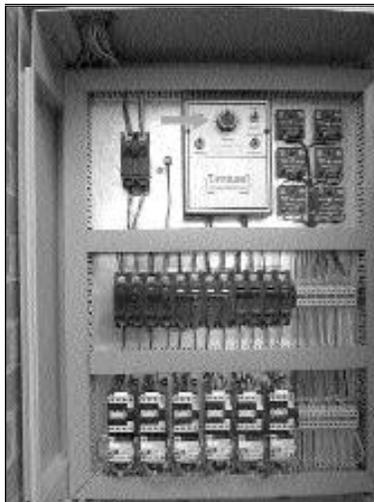
4. Bisagra Superior

La bisagra superior, por su configuración, transmite muy bien los esfuerzos que le son tangentes, ya que siempre se mantienen en contacto todos los puntos de la arista superior. Las láminas se comportan como si hubiera continuidad en la arista, reforzada adicionalmente por el material que aporta el perfil de la bisagra. Axialmente la situación cambia y no existe impedimento que restrinja el desplazamiento entre los perfiles que forman la bisagra. En el diseño original el perfil de unión estaba provisto de dobleces en los extremos para evitar que el perfil de cierre de la bisagra no se saliera. En teoría no debía produ-

Figura 47
Tubo de refuerzo
lámina de arrastre.



Figura 48
Reóstato tablero
de control.



circise ninguna fuerza axial en la cumbrera, pero debido por entramientos imprevistos de las láminas, o por el inadecuado arranque de los carros u otro hecho que afectaran la geometría del conjunto, las láminas se desplazaban una respecto a las otras para liberar las tensiones, produciendo fuerzas axiales en las que el doblado que se le había producido al perfil se enderezaba. Hubo que añadir un tope (figura 49) construido en lámina de acero inoxidable que se fijó al refuerzo de borde. Este tope permite el movimiento y mantiene el perfil en posición. Hay situaciones en las que se producen deformaciones de tal magnitud en las láminas que la fuerza generada hace fallar el tope.

El problema de los topes consiste en que al comenzar a deformarse generaban un problema causando trancas que provocan incluso la ruptura de las guayas de arrastre.

Otro defecto de la bisagra superior reside en que el perfil utilizado fue diseñado para ubicarse debajo de la lámina, requiriendo la aplicación de silicona entre el perfil y la lámina para obtener una junta hermética; por defectos en la aplicación de silicona durante el ensamblaje se presentaron algunas filtraciones de agua. En este sentido, parece conveniente que el perfil sea diseñado para ser colocado en la lámina a manera de teja, de esta forma la hermeticidad estaría garantizada sin necesidad de silicona (figura 50).

Transcurrido un año de uso, el buen funcionamiento de la bisagra persiste sin ningún tipo de mantenimiento. Cabe señalar que las bisagras inferiores no han presen-

tado ningún tipo de inconveniente durante estos años de operación, a pesar de haber sufrido una manipulación más intensa de lo que sería su operación con el sistema funcionando correctamente.

5. Deformación de Láminas de Borde

El borde lateral de las láminas fue reforzado con un ángulo de aluminio de 12 mm x 12 mm remachado sobre la misma lámina (figura 51). El refuerzo no se extendió hasta el ángulo de acero que soporta la rueda; en este punto la lámina es susceptible de doblarse. En algunos puntos, después del primer año de manipulación, comenzaron a aparecer dobleces (figura 52); en otros casos un doblado generalmente más marcado apareció al caminar sobre las láminas. Otro punto de falla es el extremo superior donde lleva fijado el tope del perfil de cierre de la bisagra superior, lugar donde en algunos casos la fuerza que éste ejerce rompe la lámina en el punto de fijación del remache, despegando el refuerzo (figura 53).

Este detalle se modificó sustituyendo el ángulo de 12 mm x 12 mm por un ángulo de 19 mm x 19 mm situado por debajo de la lámina y colocando por encima de ella una pletina de 3 mm. Se aumentó el número de remaches distribuyéndolos cada 150 mm; el ángulo fue instalado desde el apoyo de acero inoxidable hasta la cumbrera con 20 mm de separación desde el ángulo de la lámina para permitir la salida de agua y utilizando el mismo ángulo como elemento de tope de la bisagra de cumbre-

Figura 49
Tope lateral
modificado.



Figura 51
Refuerzo
borde lateral.

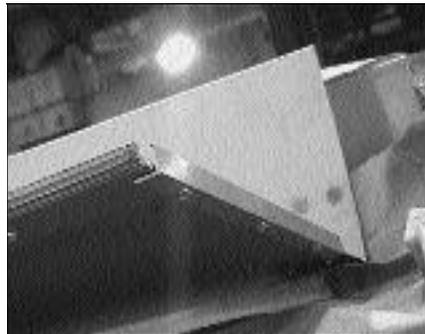


Figura 50
Modificación
de bisagra
propuesta.

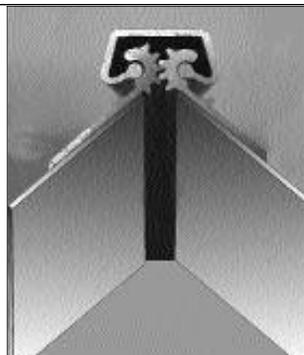


Figura 52
Dobleces en
las láminas
(producidos por
caminar
sobre ellas)



ra. Se observó una mejoría en el comportamiento de las láminas así modificadas, sin embargo, aún no tenemos datos acerca de su comportamiento a largo plazo.

6. Carros de Arrastre

Los carros de arrastre constituyen una de las piezas claves del mecanismo del techo así como una de las más comprometidas por la geometría de las láminas: no sólo deben transmitir la fuerza del motor a las láminas sino que también deben adaptar sus movimientos de rotación y de traslación. La primera versión del carro (figura 54) constaba de una doble polea apoyada en el eje del soporte de la rueda de la primera lámina (B) y una segunda rueda, enfrente (A), conectadas ambas por un soporte metálico para evitar la rotación de la polea sobre el eje de la rueda, movimiento que atascaría el sistema al apoyarse la polea sobre el riel de aluminio (figura 55). A pesar de esta previsión, la rigidez del soporte de conexión no fue la adecuada, doblándose ante la fuerza ejercida por las guayas y haciendo que la polea se frenara contra el aluminio del riel/canal. Por otro lado, en esta primera versión no se producía contacto entre el carro y la segunda lámina, lo que generaba deformaciones en las láminas; en la segunda versión del carro se reforzó toda la pieza y se agregó un tope para obtener un buen contacto entre el carro y las láminas que éste empuja (figura 56). Se presentaba así mismo una tendencia a descarrilarse por lo que se añadieron topes laterales para mantener el carro dentro de la ca-

nal. Estos cambios mejoraron el funcionamiento de todo el sistema y permitieron que comenzara a plegarse y desplegarse sin contratiempos en la mayoría de los casos. Sin embargo, módulos que una vez habían funcionado bien, en otra ocasión se atascaban al arrancar el sistema a pesar de que las posibles causas de atascamiento se habían revisado y chequeado. Se cayó en cuenta que cuando el sistema arrancaba con los carros en la posición adecuada (uno precediendo al otro de acuerdo a la geometría de las láminas) el que está en el extremo de menor ancho del prisma debía moverse más lentamente que el otro, y cuando esto ocurría las láminas se plegaban y desplegaban sin problemas. En otras ocasiones esto no ocurría así, quedándose uno de los carros retrasado y haciendo que el ángulo entre ellos aumentara (figura 57) afectando todo el sistema. Se estudió la razón por la cual los carros tenían este comportamiento aleatorio al arrancar, observándose que cuando el motor arranca y las guayas presionan axialmente los carros, estos últimos rotan sobre el eje vertical y ocasionalmente toman posiciones donde los topes laterales presionan sobre el canal de aluminio, haciendo que el roce retrase un carro con relación al otro, siendo mayor el ángulo con respecto al riel así como la presión del tope sobre éste lo que produce el atascamiento del sistema. Este problema se trató de resolver colocando refuerzos laterales con ruedas de nylon con el fin reducir el roce (figura 58) no obteniendo el resultado esperado: la

Figura 53
Tope de bisagra superior roto.



Figura 55
Movimiento de rotación de la polea de arrastre. (Produce fricción sobre el riel).

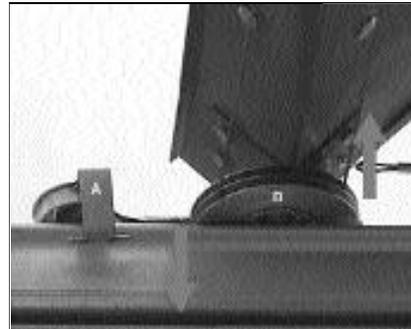
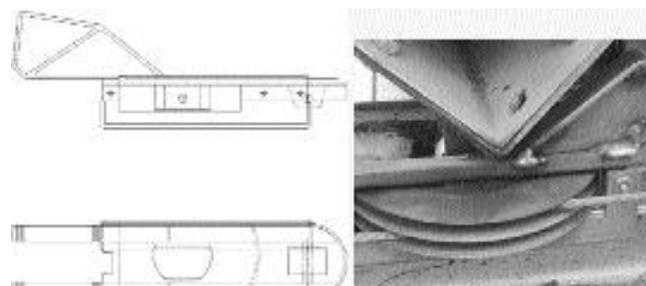


Figura 54
Carro versión inicial (proyecto).



Figura 56
Segunda versión del carro de arrastre con topes.



presión lateral es de tal magnitud que, al rodar las ruedas, levantan el carro lateralmente logrando atascarlo esta vez por rotación en el plano transversal al riel.

A pesar de las diversas modificaciones a las que se han sometido los carros, hasta los momentos no se ha obtenido una solución satisfactoria. Consideramos que el camino a seguir consiste en liberar al carro de la fuerza axial que producen las guayas incorporando una estructura externa frente a la primera lámina para soportar las poleas y conectar esa estructura a las láminas en forma tal que les otorgue suficiente libertad para realizar el movimiento de generado durante su plegado.

7. Topes

Cuando las láminas hacen contacto entre sí, la presión del empuje tiende a llevar el doblé de la lámina debajo de la siguiente. Para evitarlo se colocaron topes en forma de "L" que mantienen las láminas en posición (figura 59). Estos topes no se colocaron en el punto de apoyo de la rueda, lugar donde se inició, al azar, el efecto de resbalado del borde de la lámina, el cual, ayudado por la rueda, tendía a incrustarse sobre el borde del canal de aluminio bloqueando todo el sistema. Este aspecto fue solucionado colocando una pestaña soldada sobre el soporte de la rueda que retiene la lámina en posición (figura 60).

Figura 57
Esquema efectos del arranque fuera de tiempo de los carros.

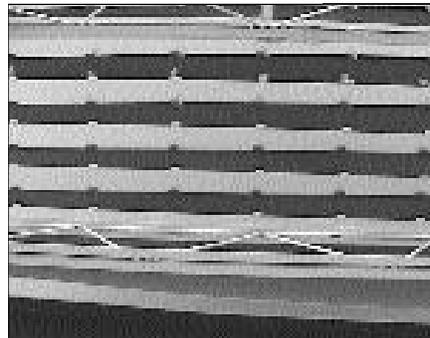
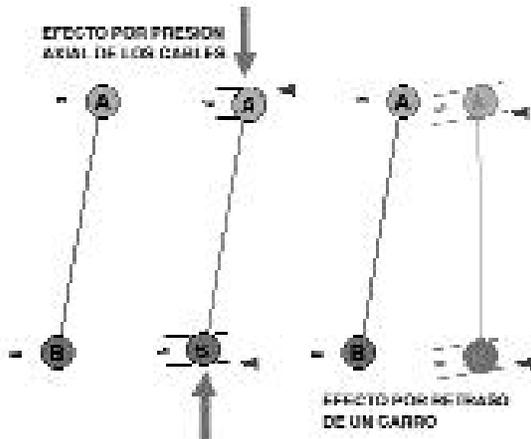


Figura 59
Topes en láminas.

Figura 58
Tercera versión del carro de arrastre con ruedas laterales.

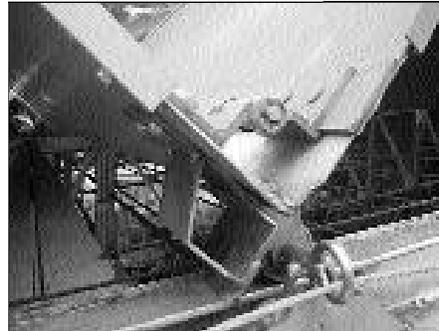


Figura 60
Nuevos toques sobre las ruedas.

Figura 61
Techo plegado vista lateral.

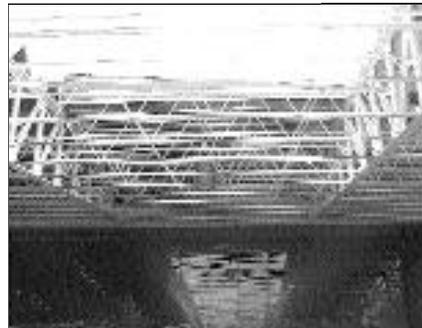
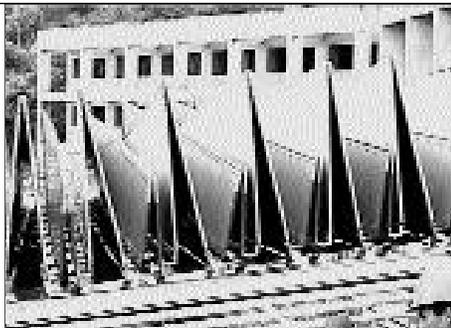


Figura 62
Techo plegado vista desde abajo.

Conclusiones

La geometría que se escogió para la cubierta es muy adecuada desde el punto de vista estructural y estético pero desde el punto de vista cinemático produce un movimiento múltiple de rotación y traslación que introduce complicaciones en los mecanismos de plegado con repercusiones en la confiabilidad del sistema. Por ejemplo, una geometría donde las aristas de las láminas fuesen paralelas simplificaría significativamente el sistema. La elección de la geometría es muy importante para el desempeño tanto estructural como cinemático de la estructura.

Se pueden construir cubiertas transformables de láminas rígidas delgadas con un buen desempeño estructural (figuras 61 y 62).

Se puede resolver el problema de estanqueidad de las juntas por la geometría de la propia lámina o por ingeniosas uniones mecánicas. Y se pueden obtener juntas móviles con un buen desempeño estructural.

Una buena solución de las juntas móviles permitirá un buen comportamiento cinemático del sistema. Las juntas deben estar diseñadas de manera que no acumulen suciedad o se corroan ya que esto traería graves problemas de mantenimiento en detrimento de la movilidad del sistema.

Referencias bibliográficas

- Arquitectura transformable*. Textos de Arquitectura, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Sevilla, 1993.
- Engel, H.(1979) *Sistemas de estructuras*. H. Blume Ediciones, Madrid.
- Hernández, C. (1987) "Deployable Structures". Tesis de grado para obtener el título de Master of Science in Architecture. MIT, Massachussets.
- Hernández, C.(1996) *New Ideas in Deployable Structures Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
- Hoberman, C.(1992) *The Art and Science of Folding Structures*. SITES Architecture, Lumen Inc.
- Pérez Piñero, E.(1992) *Estructuras desplegadas de Emilio Perez Piñero*. Fotoset S.A., España.
- Robbin, T.(1996) *Engineering A New Architecture*. Quebecor Eusey Press, Massachussets.