

Primeras propuestas en España de estructuras desplegables de barras

LINA PUERTAS DEL RÍO

DR. ARQUITECTO

En las cubiertas plegables-desplegables efectuadas con los tradicionales materiales de estructuras, se entiende la pretensión de que resulten tan eternas como los edificios, aunque algunas tipologías puedan guardarse almacenadas. Este artículo trata de una tipología correspondiente a estas estructuras.

It is commonly understood that deployable roofs, built with traditional materials, are supposed to last forever, although some of them can be stored for later use. This paper describes a typology of the latter kind

Cuando nos referimos al concepto de plegable-desplegable en edificación, estamos hablando casi exclusivamente de cubiertas, por ser éstas las partes de las construcciones en que puede ser más deseada esta característica. Hay varias alternativas para solucionar una cubierta temporal sobre un espacio. En la solución formal, la primera decisión a considerar es si se emplean cables y tejidos o estructuras más o menos parecidas a las cubiertas convencionales, es decir, establecer la posible duración de estos elementos constructivos. Las cubiertas plegables-desplegables efectuadas con los tradicionales materiales de estructuras, se entiende la pretensión de que resulten tan **eternas** como los edificios, aunque algunas tipologías puedan guardarse almacenadas. Este artículo trata de una tipología correspondiente a estas últimas.

Hablando del proyecto de estructuras plegables bajo el punto de vista científico, es decir, desde la posición del técnico que piensa la solución y la define en planos o dirige su ejecución, este campo es relativamente reciente. De todas formas, están registradas en forma de patentes algunas de las primeras propuestas de estas estructuras especiales, empleando descripciones en su definición más que las concretas representaciones gráficas.

INICIO EN ESPAÑA DE ESTA ACTIVIDAD

En los años sesenta en España, un arquitecto llamado Emilio Pérez Piñero, desarrolló un valioso trabajo particularizando soluciones plegables en el campo de las estructuras espaciales de barras, teniendo como condición prioritaria de diseño y proyecto este aspecto. Se inició en ella con un elemental conocimiento científico previo, siendo estudiante de la Escuela de Arquitectura de Madrid. El motivo concreto que le permitió la iniciación fue un ejercicio escolar: la redacción de un ejercicio a nivel de anteproyecto sobre el tema de un teatro ambulante para 500 espectadores, correspondiente a la asignatura de Proyectos de 4º curso. Este tema a su vez, era el propuesto por la Unión Internacional de Arquitectos (UIA) como actividad a desarrollar por estudiantes de Arquitectura de todo el mundo, en competición para premiar a la mejor idea en el marco de su Congreso del año 1961.

E.P. Piñero produjo una documentación consistente en planos y maqueta de la cubierta. Esta era una estructura espacial de barras y cables, de doble curvatura y canto constante, que se desplegaba desde el camión de transporte. Hay una característica importante en ello, y es que en el paquete plegado iban todas las barras necesarias. En la ETSAM se seleccionó éste y otro de los trabajos de los alumnos con el fin de participar en el concurso patrocinado por la UIA. La importancia de esta manifestación cultural era grande, con una incidencia en el colectivo de arquitectos bastante más importante de lo que es hoy día: el

colectivo mundial de arquitectos era mucho menor, e incluso la discusión de los temas estaba abierta a otros profesionales. En el jurado del concurso no solo había arquitectos (entre ellos Félix Candela) sino ingenieros civiles como Ove Arup o Richard Fuller. Con respecto a éste último, su famosa patente sobre una discretización geodésica de la superficie esférica llevaba siete años de inscripción y se ocupaba de aspectos del diseño de estructuras espaciales conocidas bajo el nombre de Tensegrity.

La elección por parte de E.P. Piñero, de presentar una maqueta para la transmisión de la información de la estructura de barras y cables de la cubierta, fue un completo acierto, pues por muchos dibujos de definición que hubiese ejecutado no habría conseguido que la comprensión de la organización espacial fuese exacta. Entre otros aspectos, porque se trataba de un planteamiento nuevo. Recibió el primer premio. La definición espacial así como la más esquemática de los nudos fue objeto de patente por su parte, que lleva el número 266801.

Quiero destacar que este arquitecto fue un pionero en la investigación mundial sobre el planteamiento de estructuras desplegables. A partir de esta entrada triunfal en el tema, E.P. Piñero dedicó los siguientes años a estas estructuras espaciales de barras, desplegables y también desmontables, los cuáles fueron once, hasta su muerte en accidente de tráfico. Sobre su dedicación cabe decir que corresponde por completo al estudio e investigación de una tipología de estructuras desplegables y espaciales, dando soluciones estructurales y soluciones de piezas componentes; me voy a referir aquí sólo a lo más importante y completo de sus trabajos, y que servirá para entender el campo de aplicación de esta tipología.

ELECCIÓN DE LA UNIDAD MÓVIL Y SU FUNCIONAMIENTO

No debemos olvidar que una estructura desplegable debe funcionar ante todo como estructura, es decir, como una forma estable capaz de transmitir cargas a los apoyos mediante solicitaciones y deformaciones de sus componentes, en este caso una disposición espacial de barras, con o sin cables, donde cada componente se va a poder mover. Para el plegado, debe perder la cualidad estructural: se deben deshacer los enlaces entre barras que hacen del conjunto una forma geoméricamente estable capaz de resistir esfuerzos, a otra tan incapaz de aguantar como sea posible fácilmente, al objeto de que la manipulación para el plegado-desplegado sea sencilla. Esto quiere decir que la estructura se debe transformar en su concepto opuesto: el mecanismo.

Dentro del campo de las estructuras espaciales de barras, éstas se definen para que sean geoméricamente estables bajo cualquier tipo de carga suponiendo que los enla-

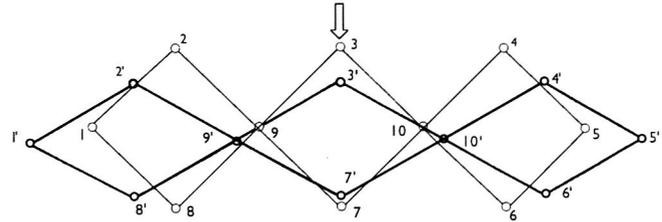


Figura 1. Movimiento único en todas las barras

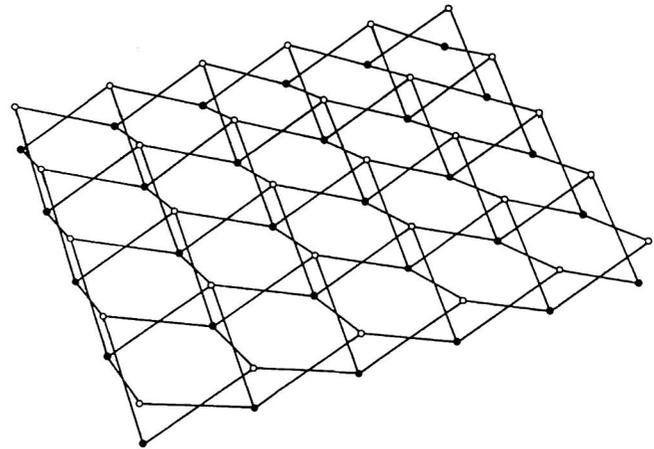


Figura 2. Cuadrados

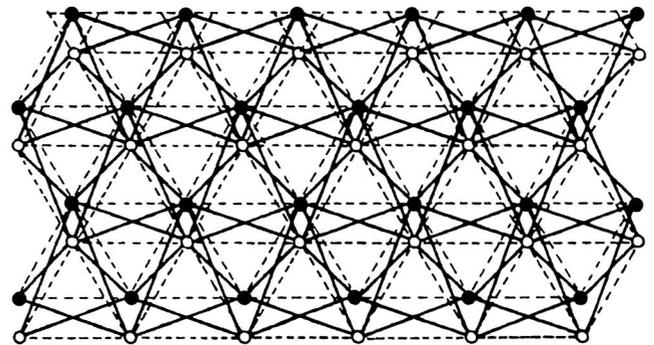


Figura 3. Triángulos

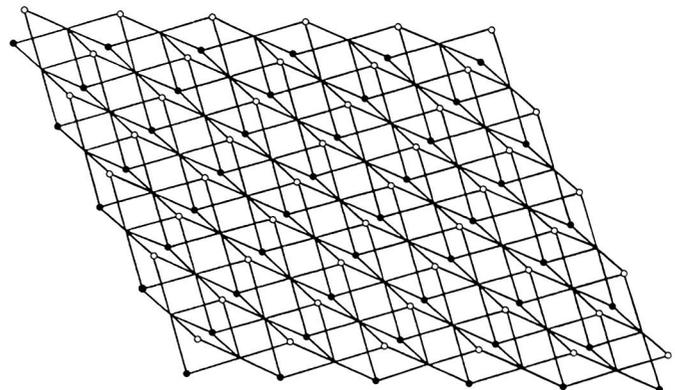


Figura 4. Cuadrados en diagonal

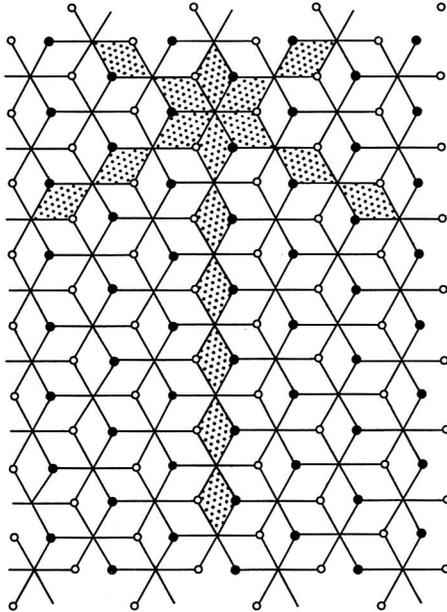


Figura 5 Triángulos

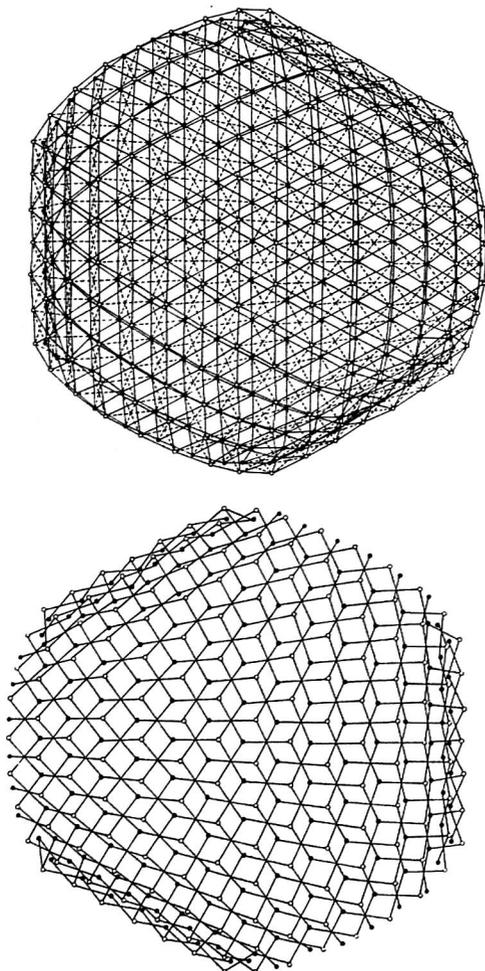


Figura 6. Mecanismo base y estructura

ces entre barras son rótulas esféricas, es decir, que las uniones entre barras tienen tres libertades de movimiento distintas correspondientes a tres giros. En la práctica los nudos que enlazan las barras son inmóviles. En el campo particular de las espaciales desplegables de barras, alguno o varios de estos movimientos tienen que ser posibles de verdad, por lo que la definición de la pieza de nudo con los enlaces es un apartado importante, más si cabe que en las inmóviles; a poco que se haya estado interesado en estas tipologías se habrá advertido la variedad y alta cualificación de soluciones existentes.

El diseño de nudos, la cantidad de libertades de movimiento que contengan en sus enlaces a barras y la forma de estar distribuidos, condiciona la forma de manejo. Si una cualidad deseable es que, como estructuras, abarquen todo el campo de uso de las inmóviles, como mecanismos es que sean cómodamente manejables con pocos movimientos y absolutamente controlados. Esto último está brillantemente resuelto en la tipología a la que se consagra Pérez Piñero. Eligió poner todos los nudos de la futura estructura y las barras contenidas en el canto según un módulo repetitivo de dos barras dispuestas formando una \times : cada barra tiene tres nudos, uno más o menos central y los dos de los extremos (figura 1). Los enlaces entre barras y nudos tienen libertad de giro según un eje perpendicular a la barra. La forma más simple consiste en unir dos por el nudo central, que funciona como unas tijeras. El paso siguiente consiste en unir varias de estas \times : por los extremos a piezas de nudo, donde también se debe mantener la libertad de giro. Se une el número que se quiera, siempre se mueve modificando los ángulos y la longitud de las diagonales de los cuadriláteros que quedan definidos, a la vez, según un único movimiento.

Verdaderamente no se puede decir que no sea una disposición bastante común en objetos de uso cotidiano. Los objetos más grandes que estamos acostumbrados a ver son los cierres de seguridad para acceso de locales u otros huecos, llamados de ballesta y tijerilla: una serie de barras verticales contenidas en un plano enlazadas por varias filas de \times : que las sirven tanto de arriostramiento por inestabilidad como de elemento transmisor del movimiento donde quiera que lo iniciemos.

Con esta mínima concepción, Pérez Piñero concreta disposiciones espaciales en dos y tres direcciones, de varias clases.

LOS MECANISMOS

En esta tipología, como mínimo siempre hay una parte de las barras, las contenidas en el canto de la estructura y todos los nudos, que permanece junta en un único bloque. Es la parte que conserva el movimiento muy ordenado. A este mecanismo que podríamos llamar base, se le añaden

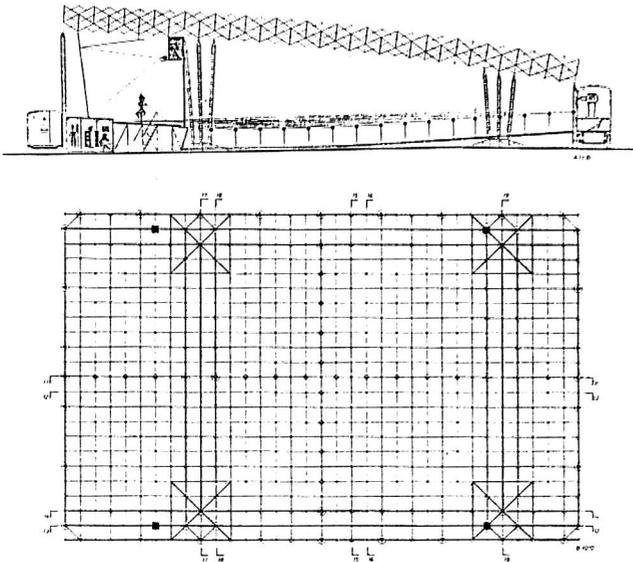


Figura 7. Teatro ambulante desplegable

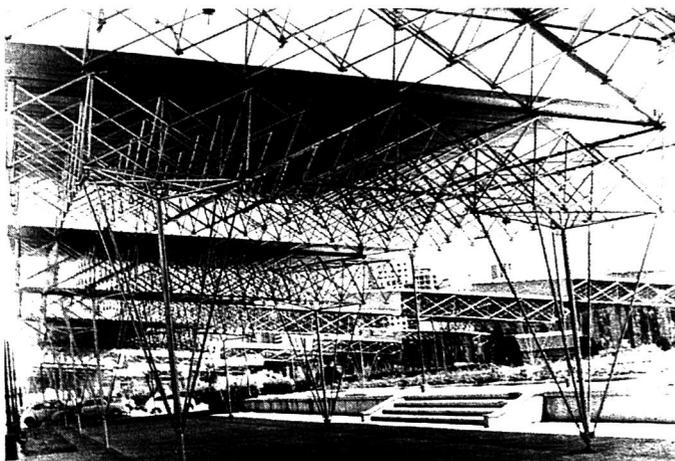


Figura 8. Montaje de "25 años de paz"

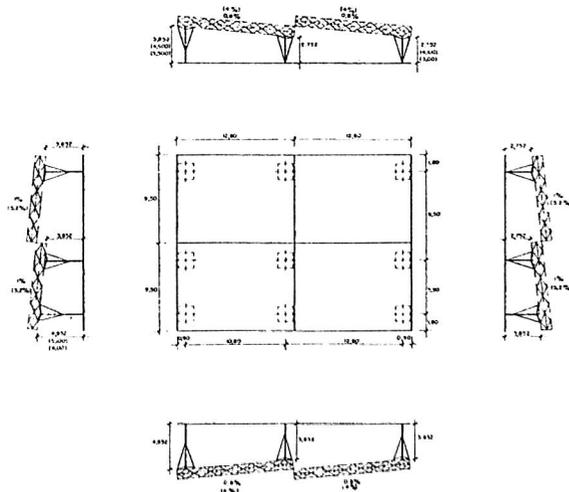


Figura 9. Montaje

barras, que puede hacerse en cantidades y disposiciones variables para llegar a contar con estructuras tan eficientes como las inmóviles. El perfeccionamiento del tema, consiste en meter todas las barras necesarias en el bloque con el fin de reducir la manipulación de desplegado y montaje.

Las posibilidades que existen de modular soluciones en el espacio, son las siguientes:

- Disponer estas **cadenas de x**: en dos direcciones ortogonales: a las piezas de nudo de los extremos van cuatro barras diagonales, y en el centro sólo se cruzan dos. Los nudos en las caras superior e inferior son los puntos de cruce de una retícula de cuadrados. (figura 2) Disponerlas en tres direcciones, bien cada 60° con lo que los nudos de ambas caras estarían en una retícula de triángulos equiláteros, o bien intercalando una a 45° en el caso anterior. En el centro del canto sólo se contienen los enlaces de cruce de dos barras. (figura 3)

- Intercalar en la primera opción un grupo igual, desfasado la mitad del lado del cuadrado: ahora hay también nudos en caras superior e inferior en el centro de los primitivos cuadrados; en los puntos de cruce del centro del canto enlazan dos "x" en posición ortogonal, es decir, cuatro barras. Ahora los nudos en ambas caras quedan al tresbolillo, pero se puede trazar una cuadrícula que los contenga si ésta se hace a 45° respecto de las direcciones ortogonales anteriores. (figura 4)

- Por último queda la opción de enlazar en los nudos de cruce de la mitad del canto tres barras, y la forma resultante se puede describir como de dobles tripodes enlazados. Ahora los nudos de las caras superior e inferior están en los vértices de una retícula de triángulos. (figura 5)

PRIMERA PROPUESTA

Como mencionó anteriormente, entró en el tema con un ejercicio de curso. La cubierta que proyectó era un trozo de superficie esférica de contorno exagonal no regular; lo podemos definir mejor como un triángulo esférico al que se le han suprimido tres trozos iguales de su superficie en la zona de cada vértice. Constaba de los siguientes componentes: (figura 6)

- Una capa exterior de cables describiendo una retícula triangulada en toda su superficie. Los cables eran continuos, pasantes por la pieza de nudo.

- Barras en el canto de dos tipos; por una parte tubos con posibilidad de enlace a tres nudos, dos situados en los extremos y otro aproximadamente central. Estas barras, dispuestas en manojos de tres, son las responsables de que el movimiento como mecanismo tenga muy pocos grados de libertad. En este caso son tres, y son los mínimos necesarios para que un punto se pueda desplazar por el espacio buscando su posición exacta. Uniendo los nudos extre-

mos situados en ambas superficies, coloca cables; estos cables se tienen que separar del nudo en uno de los extremos para que la estructura se pueda convertir en mecanismo y plegarse.

- La cara interior de la curvatura también estaba completamente triangulada por cables, utilizando todos los nudos disponibles.

Para su definición geométrica, se debe considerar que sólo los nudos contenidos en medio del canto, son los que deben de situarse en la superficie esférica elegida. El resto de la geometría debe cumplir con estas condiciones de curvatura.

ESTRUCTURAS QUE DEFINIDAS POR E. P. PIÑERO

Aunque realizó numerosas maquetas de prueba, me voy a referir sólo a los trabajos que alcanzaron mayor definición. Estos son, una obra realizada, un proyecto completamente definido y una maqueta a gran escala, en la que fue posible un generoso nivel de definición de los componentes.

Desplegables en forma de superficies planas

Por orden cronológico, la primera corresponde a un proyecto redactado con bastante detalle y en el que incluye los cálculos realizados. Es la envolvente que posibilita un espacio para uso de teatro ambulante desplegable. Consta de estructura plana de cubierta, la cual es plegable con todas sus barras, soportes perimetrales abiertos de sección triangular y arriostramientos, y cuatro soportes especiales de sección cuadrada. (figura 7)

La cubierta es un emparrillado de vigas en dos direcciones ortogonales. Estas vigas son trianguladas de cordones paralelos y canto constante, pero esta definición no explica suficientemente su especial forma, porque los cordones son en zig-zag aunque siempre paralelos. Las barras que contiene el canto son diagonales, como las de las cerchas de diagonales, y montantes uniendo cada nudo superior con su correspondiente inferior. Para aclarar mejor su comprensión: todas estas componentes se consiguen con solo dos tipos de barras, inclinadas y verticales. Estas son los montantes, y las inclinadas son barras que enlazan a cuatro nudos, y que por tanto dividen en tres tramos: los dos extremos funcionan como cordones y el central como diagonal.

El emparrillado se puede plegar porque existen las siguientes libertades de movimiento: los enlaces entre las barras inclinadas y las piezas de nudo tienen la capacidad de poder efectuar giros, y existe la capacidad de efectuar deslizamientos por parte de los montantes; todos ellos son necesarios para cambiar la geometría de un triángulo: variar la longitud de un lado y poder variar los ángulos. Las barras

mas complejas son los montantes pues para poder modificar su dimensión tienen que ser telescópicas, y por el canto dado y la longitud e inclinación de las otras barras, es decir, por las condiciones geométricas en el plegado y en el desplegado, es necesario que sean telescópicas de tres tramos. El tramo exterior es el que tiene función estructural. El movimiento de todo el conjunto sólo tiene un grado de libertad, es decir, es un único movimiento donde todos los elementos se mueven a la vez. El mecanismo, completamente plegado sería como un compacto cubo (mejor, prisma) de barras que cuando se va desplegando aumenta la superficie de sus bases al mismo tiempo generando paralelogramos semejantes conforme va disminuyendo la altura hasta quedar con el canto estructural definido.

La otra realización se podría definir como una obra ejecutada y que estuvo en uso en los años 60. No es de carácter permanente debido precisamente a su carácter plegable. Actualmente su paradero es desconocido. Consistía en la envolvente para una exposición al aire libre. Concretamente la exposición “25 años de paz” que promovió el antiguo Ministerio de Información y Turismo. El autor lo resolvió realizando una propuesta modular. Definió un módulo tipo con algunas variantes, y un soporte. La exposición tenía carácter itinerante y debía adaptar su planta a cada lugar designado. (figura 8)

El módulo constaba básicamente de una superficie plana de cubierta de $12.5 \times 9.5 \times 1$ en posición de desplegado, y de un soporte tipo. Cuatro de estos soportes recibían al primer módulo, pero el resto se apoyaban en los módulos previamente montados; en una disposición compacta, los módulos interiores sólo necesitan un soporte (figura 9). En este caso, la parte plegable la componen las barras contenidas en el canto de la estructura y todos los nudos, es decir, todas las **x** (figura 10). Una vez desplegada esta parte, se añadían barras en cara superior e inferior hasta completar cinco parejas de cordones en una dirección y dos más, ocupando los bordes extremos, en la otra, que también recibía montantes hasta que todo el canto de esos bordes quedaba triangulado. Quedaba un porcentaje alto de nudos sin utilizar. La estructura resultante se podría definir como de unas cerchas arriostradas, suficiente para carga y luz entre apoyos. El tipo de apoyo era a lo largo de bordes sobre módulos previos o sobre los pilares. En este caso el **apoyo** lo formaban la unión de cinco nudos (cuatro en los vértices de un cuadrado y uno en su centro) a una pieza rígida especial fundida en molde, a la que se le podría calificar de **capitel**. Estaba unida al **fuste** por medio de una rótula e inmovilizada por cuatro barras en forma de pirámide invertida, desde los vértices del capitel al suelo. El apoyo era una placa enlazada al **fuste** también mediante rótula, por lo que, con el pilar aplomado, la base rotaba lo que le pidiera el suelo de apoyo y la cubierta tenía la pendiente dese-

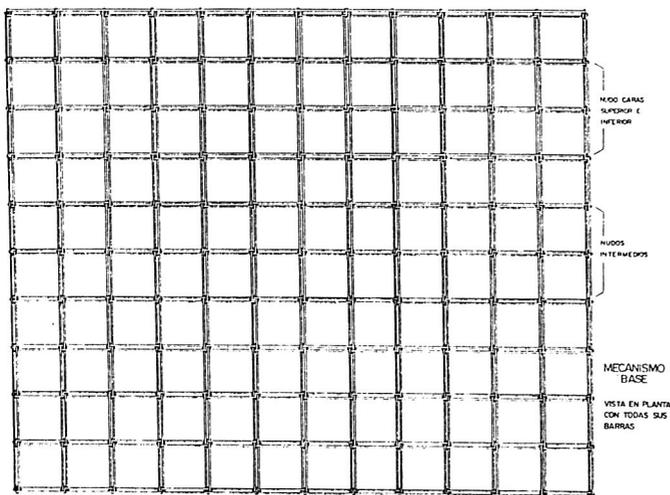


Figura 10. Mecanismo base

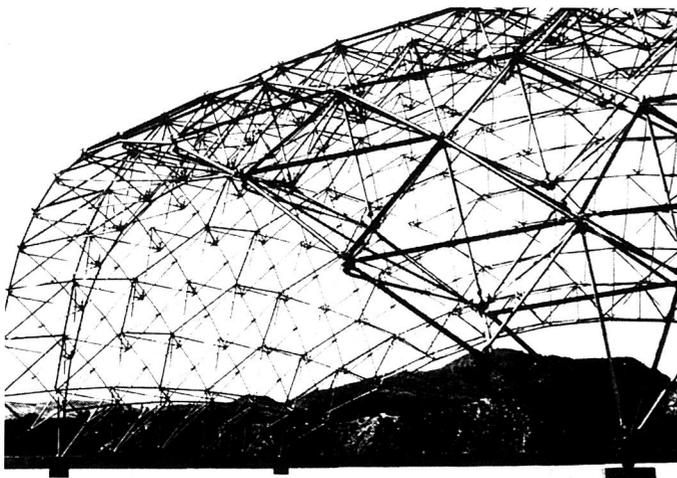


Figura 11. Partes componentes



Figura 12. Cúpula para grandes luces

ada a partir de la rótula superior antes descrita. El material empleado fue aluminio en tubos redondos para todas las barras excepto para los cordones inferiores, de sección maciza (a modo de tirantes con tensor incluido). Las piezas de nudo eran de acero.

Desplegable en forma de superficies de doble curvatura

Básicamente es la definición de la propuesta con que se inició en el tema, pero mucho más refinada y mejor resuelta. La llamaba **Cúpula para grandes luces**. Representa el modelo para una cúpula de unos 60 m de diámetro, la cual se transportaría dividida en siete partes plegadas. Todas las barras son tubos y siempre están en los paquetes plegados, es decir cuando el mecanismo se transforma en estructura, no se añaden barras adicionales.

Como no podía ser de otro modo el mecanismo mínimo, compuesto por las barras que se pueden enlazar a tres nudos (las **x**) es la parte invariable de la propuesta, (semejante a la que se puede ver en la figura 6) porque representa la cantidad mínima de barras que es necesario reunir en esa disposición para tener pocos movimientos independientes. En ese mínimo conjunto están presentes todos los nudos de la estructura. Además de éstas, en el canto se disponen barras que unen cada nudo superior con cada nudo inferior; siempre enlazadas, deben ser telescópicas para poder acompañar el movimiento y adecuarse a los cambios de longitud que se producen, siendo la mínima en estado de estructura y la máxima, completamente plegada.

En la cara exterior las barras forman una retícula exagonal. Aparte las simetrías, esta retícula es irregular, es decir, las longitudes de las barras son desiguales, por lo que también es necesario que puedan variar su longitud, aunque en pequeña medida, porque plegadas, todas deben tener la misma longitud, que es la máxima. Con estas pocas barras, quedan sin empleo una porción de los nudos, situados en el centro de cada exágono. En la cara interior no se disponen barras. (figura. 11) Los bordes tienen tratamiento especial. La cúpula tiene seis apoyos puntuales. Entre apoyos, en la curvatura del borde, hay verdaderos arcos triangulados de sección aproximadamente triangular, y bases alternativamente situadas en cara superior e inferior. (figura 12)

CONCLUSIÓN

En grandes cubiertas, en estructuras ejecutadas y en uso en la actualidad, los movimientos empleados para cubrir y descubrir espacios, son deslizamiento o deslizamiento y giro de trozos rígidos de la estructura; generalmente, del número de partes móviles independientes en que se ha

dividido la estructura, depende el porcentaje de espacio descubierto. En estos casos, es importante solucionar las juntas entre trozos y los sistemas de movimiento, (carriles, rodamientos y energía). Sin embargo, en el sistema descrito, se mueven todos los elementos consiguiendo no solo que prácticamente todo el espacio quede abierto sino que se pueda desmontar y transportar de forma asequible. El movimiento en esta solución se encuentra en cada enlace de barra y nudo. Los buenos resultados dependen de que esa relación funcione, considerando los requerimientos estáticos y cinemáticos, es decir en su comportamiento como estructura y como mecanismo. Emilio Pérez Piñero diseñó varias piezas de nudo para sus modelos y para sus estructuras, y unas funcionaron mejor que otras. Si se piensa en el grado de perfección adquirido por las piezas de nudo en las estructuras espaciales de barras convencionales, se puede intuir el trabajo necesario a desarrollar todavía.

BIBLIOGRAFÍA

1. PUERTAS DEL RÍO, L.: *ESTRUCTURAS ESPACIALES DESMONTABLES Y DESPLEGABLES*. ESTUDIO DE LA OBRA DEL ARQUITECTO EMILIO PÉREZ PIÑERO. TESIS DOCTORAL, pp488. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 1989.
2. PUERTAS DEL RÍO, L.: *ESTRUCTURAS ESPACIALES DESMONTABLES Y DESPLEGABLES*. INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, N° 409, pp. 43-53, 1990.
3. PUERTAS DEL RÍO, L.: *SPACE FRAMES FOR DEPLOYABLE DOMES*. BULLETIN OF I.A.S.S., N° 106, pp. 107-113, AGOSTO 1991.

SE PUEDE CONSULTAR INFORMACIÓN GRÁFICA PRODUCIDA POR E.P. PIÑERO, EN LAS SIGUIENTES REVISTAS:

4. ARQUITECTURA N° 30, JUNIO 1961, pp. 27-35.
5. INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN N° 231, JUNIO 1971, pp. 37 Y 38.
6. ARQUITECTURA N° 110, FEBRERO 1968, pp.54 Y 55.
7. ARQUITECTURA N° 112, ABRIL 1968, pp. 5-18.
8. NUEVA FORMA N° 53, JUNIO 1970, pp. 58 Y 59.