

LAS CUBIERTAS DESPLIEGABLES DE MALLA CUADRANGULAR

Por FELIX ESCRIG
JUAN PEREZ VALCARCEL
JOSÉ SÁNCHEZ SÁNCHEZ

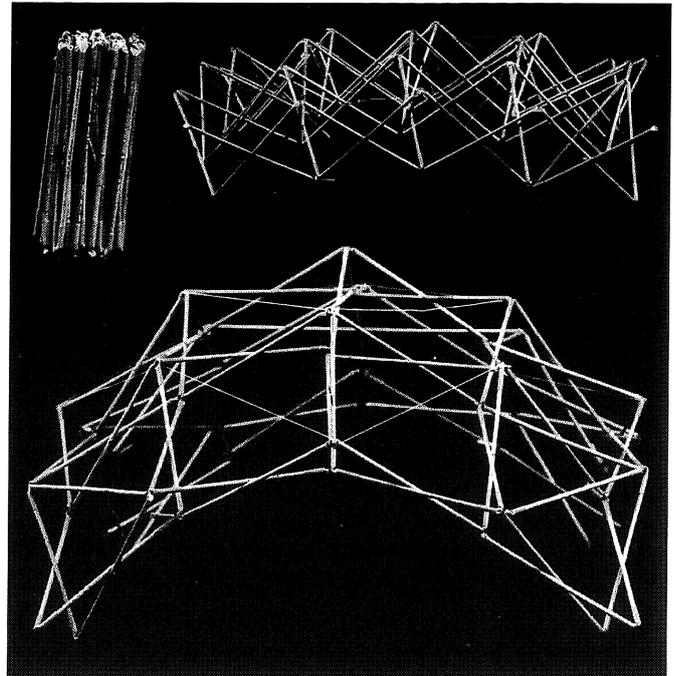


Fig. 2

RESUMEN

Las cubiertas desplegables han generado hasta el momento mucha literatura pero muy pocas realizaciones. Esto explica la importancia que tienen algunas de las aplicaciones que se han construido y que funcionan con eficacia. En este artículo se describen algunas de ellas, unas construidas y otras en proyecto para ser llevadas a la práctica.

La más importante es la cubierta de la Piscina San Pablo de Sevilla, de 60x30 metros con un volumen cerrado de 1.100 metros en su estado abierto y 66 m² plegada, incluidas la estructura y todos los elementos complementarios. También se muestran otros ejemplos igualmente interesantes.

1. CASQUETES ESFÉRICOS CON BARRAS DE IGUAL LONGITUD

Se basan en la combinación de módulos como los mostrados en la figura 1. Cada uno de los módulos tiene dos grados de libertad en su conformación geométrica. Uno es el ángulo θ que forman las barras de las espas y otro es el ángulo de los cuadriláteros que en nuestro caso, al no ser cuadriláteros planos $\sum \alpha_i \neq 2\pi$, aunque δ_i es una constante en cada fase del desplegado. Todas las barras son de la misma longitud y con la articulación excéntrica. Combinando estos

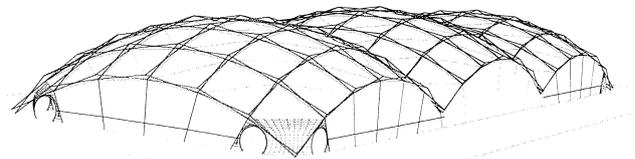


Fig. 3

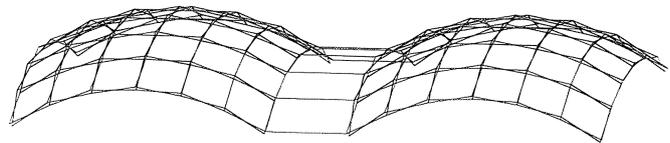


Fig. 4

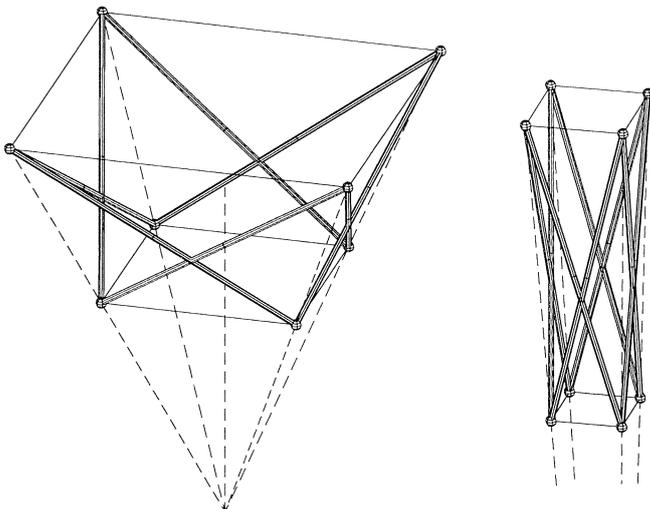


Fig. 1

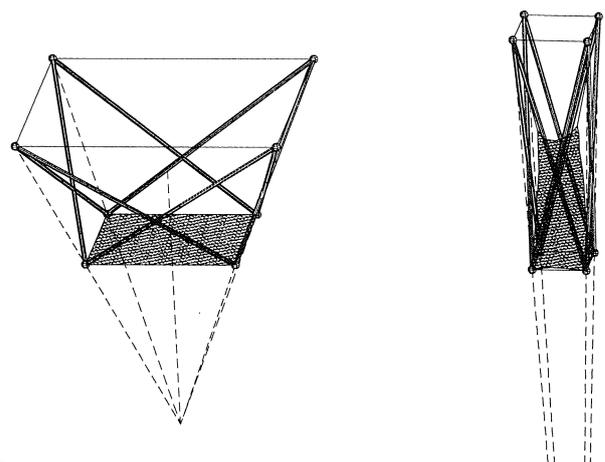


Fig. 5

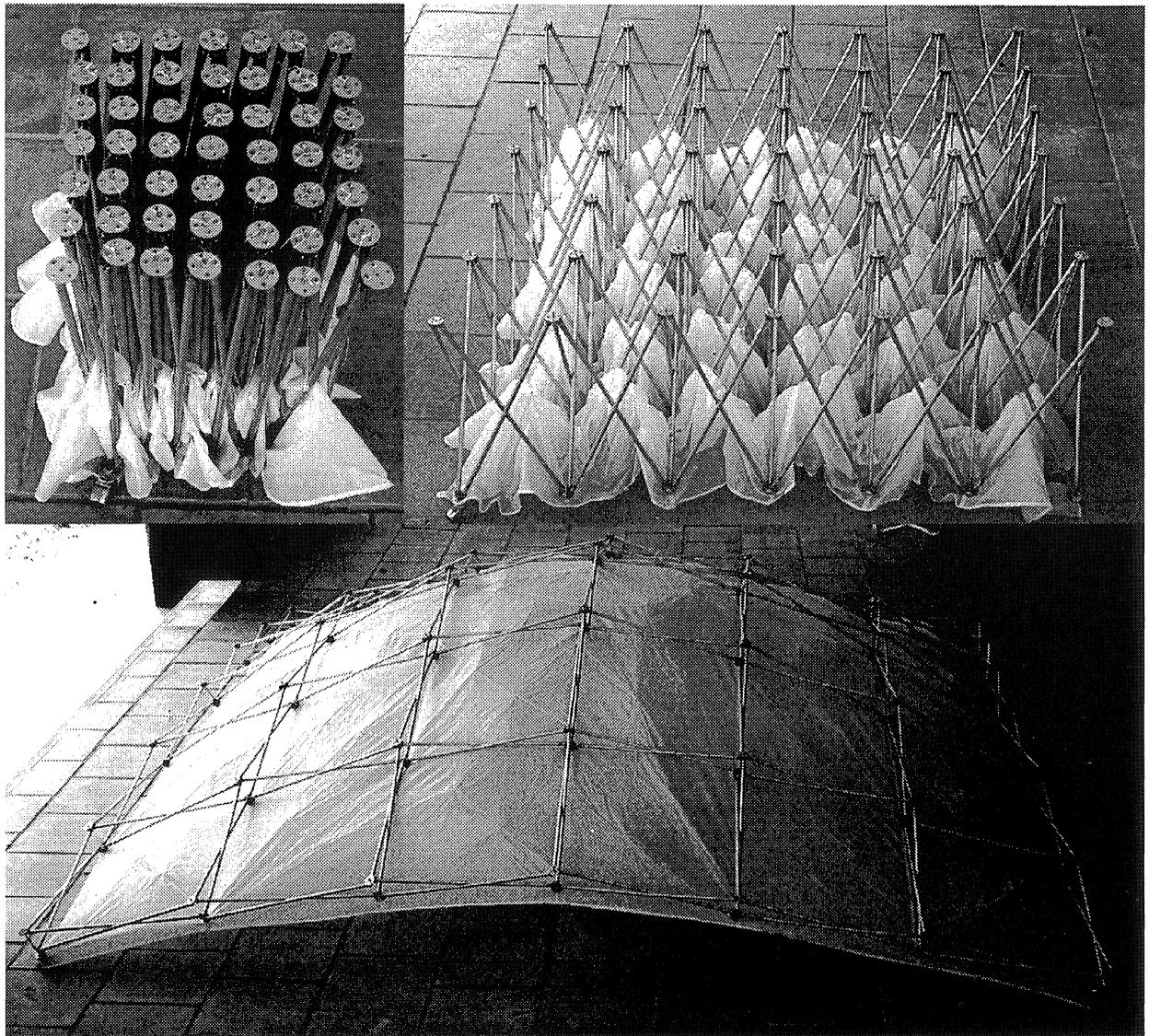


Fig. 6

módulos crean conjuntos como los de la figura 2, de gran estabilidad si se rigidizan mediante diagonales, aunque sean cables.

Una característica derivada que las superficies que unen los nudos superiores o los inferiores son esferas concéntricas es que la unión de cada par de nudos está alineada con el centro de la esfera. Los nudos de los bordes, por tanto, no están en un plano sino en una superficie cónica. Sin embargo, si lo están los nudos superiores y los inferiores. Ello hace que sea posible ensamblar varios conjuntos de éstos modularmente como se expresa en la figura 3. Aunque no las uniéramos directamente también podrían obtenerse formas como las de la figura 4.

Si como cubierta utilizamos un textil estructural éste puede colaborar en la rigidización del conjunto (fig. 5) y, por tanto, dar conjuntos como los de la figura 6. Tanto si el textil está por la cara superior, la inferior o por ambas a la vez podemos utilizar un dispositivo de tensado como el de la figura 7 que hace que aquel se repliegue hacia los huecos que deja la estructura haciendo el empaquetamiento ordenado.

Basándonos en estos principios expuestos hemos construido una cubierta para una piscina olímpica cubriendo 1.800 m² con el proyecto que se indica en la figura 8 y cuyo proceso de construcción se ilustra en las distintas imágenes de la figura 9. En este caso utilizamos dos módulos conectados por un borde común que unía nudos superiores.

Otro proyecto que resolvimos con los módulos independientes en plantas rectangulares es el que se muestra en la figura 10 que soluciona la climatización de las piscinas de un hotel de La Coruña.

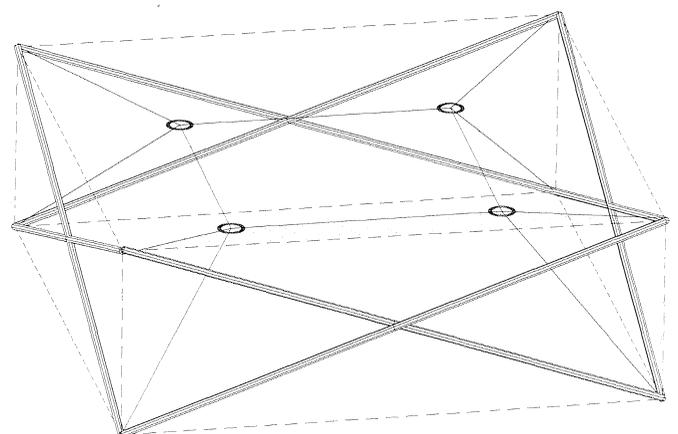


Fig. 7

Estas soluciones han demostrado ser útiles pero necesitan después del despliegue seguir consumiendo horas de grúa y de trabajo para emplazar las barras diagonales y los elementos soporte de borde. Paradójicamente este proceso es el más largo y más costoso cuando debería ser más automatizado (fig. 11). Por ello hemos buscado soluciones más optimizadas.

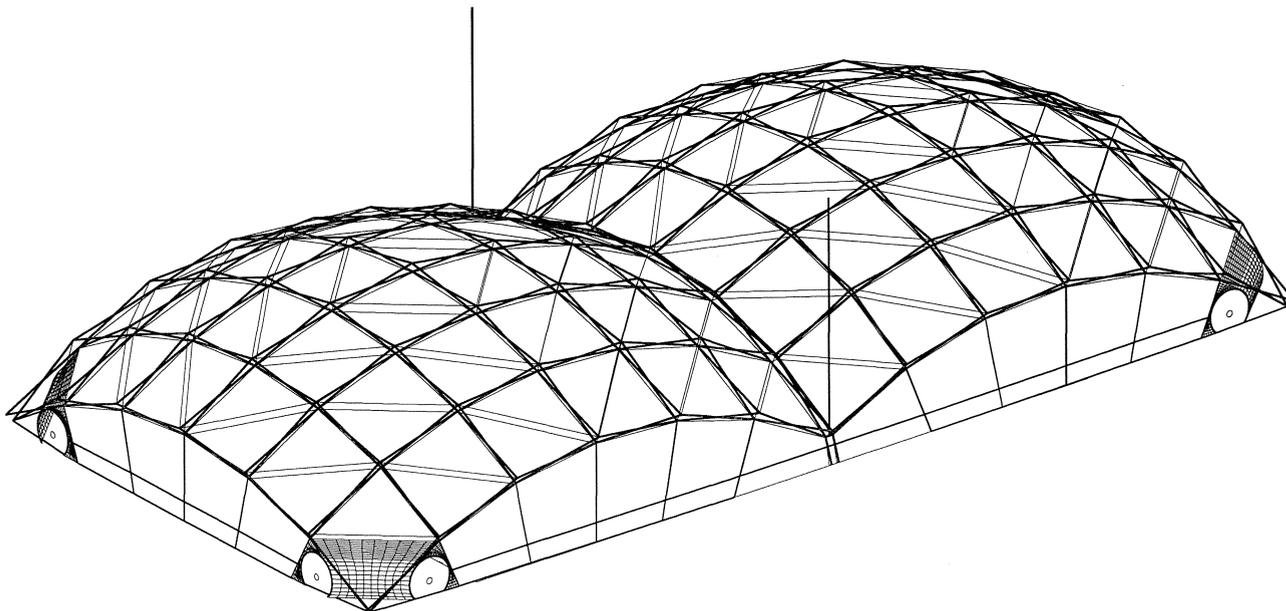


Fig. 8

2. CUBIERTAS CILINDRICAS

En este caso las barras utilizadas también tienen todas la misma longitud, pero su despliegue se produce sobre una superficie cilíndrica (fig. 12). También en este caso, aunque fijemos todos los nudos que están sobre el plano del suelo, necesitamos estabilizar angularmente la estructura y esto lo conseguimos introduciendo barras diagonales o utilizando bielas que acompañen en el plegado a los restantes elementos (fig. 13).

Con ello podemos obtener soluciones como las de la figura 14, con el que proyectamos cubrir una piscina semiolímpica de 25x12 metros.

La ventaja de las cilíndricas sobre las esféricas es que hay que diagonalizar menos módulos y los soportes de las piscinas no son necesarios para la estabilidad de la estructura aunque sí sean útiles.

Otra ventaja es que en el desplegado las cilíndricas permiten superar el ángulo de acodamiento dando cantos pequeños (fig. 14).

Denominamos ángulo de acodamiento a aquel en que $\delta = \beta$ (fig. 15). Si éste se sobrepasa, la estructura ya no puede volver a ser plegada. Sin embargo, en las cilíndricas esto no importa, puesto que en la dirección recta jamás puede acodarse, puesto que $\beta = 0$.

3. CUBIERTA ESFÉRICA CON DIVISIÓN EN MERIDIANOS Y PARALELOS

Las cilíndricas no sólo no han terminado de resolver el problema, sino que han creado otro nuevo. La excesiva altura de los piñones planos los hace muy problemáticos frente a las acciones del viento.

También el hecho de que tengan planos de aspas rectos les da cierta inestabilidad.

Tenemos soluciones alternativas que evitan este problema. Por ejemplo, la subdivisión esférica en meridianos y paralelos (fig. 16).

Con ello, la altura de los piñones puede ser muy inferior a la de las zonas centrales e incluso puede tener el tamaño justo para emplazar el acceso. Pero es que, además, el estar utilizando módulos trapezoidales en lugar de paralelos diagonaliza por sí mismo la estructura sin necesidad de utilizar barras diagonales suplementarias (fig. 17). En cualquier fase del desplegado la estructura es estable y por tanto nuestra estructura es rígida.

La dificultad estriba, en este caso, en que todas las barras ya no tienen la misma longitud y su determinación no es sencilla.

Si atendemos los conceptos básicos y enunciados en publicaciones precedentes como los citados en las ref. 2 y ref. 5 sabemos de la figura 18 que deben cumplirse las relaciones entre las longitudes básicas que se señalan en ella y ello significa que con ello obtenemos formas de planta esférica solamente y secciones semicirculares.

La figura 19 muestra las relaciones entre los ángulos α_1 y α_2

$$\cos(\alpha_1 + \alpha_2) \operatorname{sen} \alpha_1 = \operatorname{sen} \alpha_2 \rightarrow \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\operatorname{sen} \alpha_1 \cos \alpha_1}{1 + \operatorname{sen} \alpha^2 \alpha_1} \quad [1]$$

La figura 20 muestra las relaciones entre los ángulos α_3 y sus antecesores

$$\cos(\alpha_T + \alpha_3) \operatorname{sen} \alpha_3 = \operatorname{sen} \alpha_3 \rightarrow \operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{\operatorname{sen} \alpha_1 \cos \alpha_T}{1 + \operatorname{sen} \alpha^2 \alpha_T + \operatorname{sen} \alpha^1} \quad [2]$$

En general,

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{sen} \alpha_1 \cos \alpha_T}{1 + \operatorname{sen}^2 \alpha_T \operatorname{sen} \alpha_1} \quad \text{con } \alpha_T = \alpha_1 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} \alpha_i$$

4. CUBIERTAS OVALES CON DIVISION EN MERIDIANOS Y PARALELOS

Si queremos cubrir formas alargadas y aprovechar las ventajas del planteamiento anterior utilizamos una combinación de formas cilíndricas y esféricas en lo que no deja de ser una oval en que el radio de un arco es ∞ (fig. 21).

Esta solución ha sido construida para un modelo sencillo que se muestra en la figura 22 en su estructura y en la figura 23 completa.

El desplegado se hace con suma facilidad en el plazo de cinco minutos y sin ningún medio auxiliar que no vaya incluido en la propia estructura.

El modelo de las figuras anteriores se ha resuelto con cubierta transparente que permite una ganancia energética importantísima. Las mediciones realizadas sobre una piscina de 10x5 metros han resultado en el aumento de la temperatura del agua en 1°C diario en el mes de febrero en Sevilla, que fue lluvioso y frío hasta alcanzar los 24°C y se tomaron medidas de 37°C en los primeros días de marzo.

Ello nos ha llevado a comenzar un estudio que permita, en piscinas unifamiliares para chalets o urbanizaciones utilizar la piscina en invierno y aprovechar el agua caliente de la misma para ser recirculada para la calefacción de las viviendas.

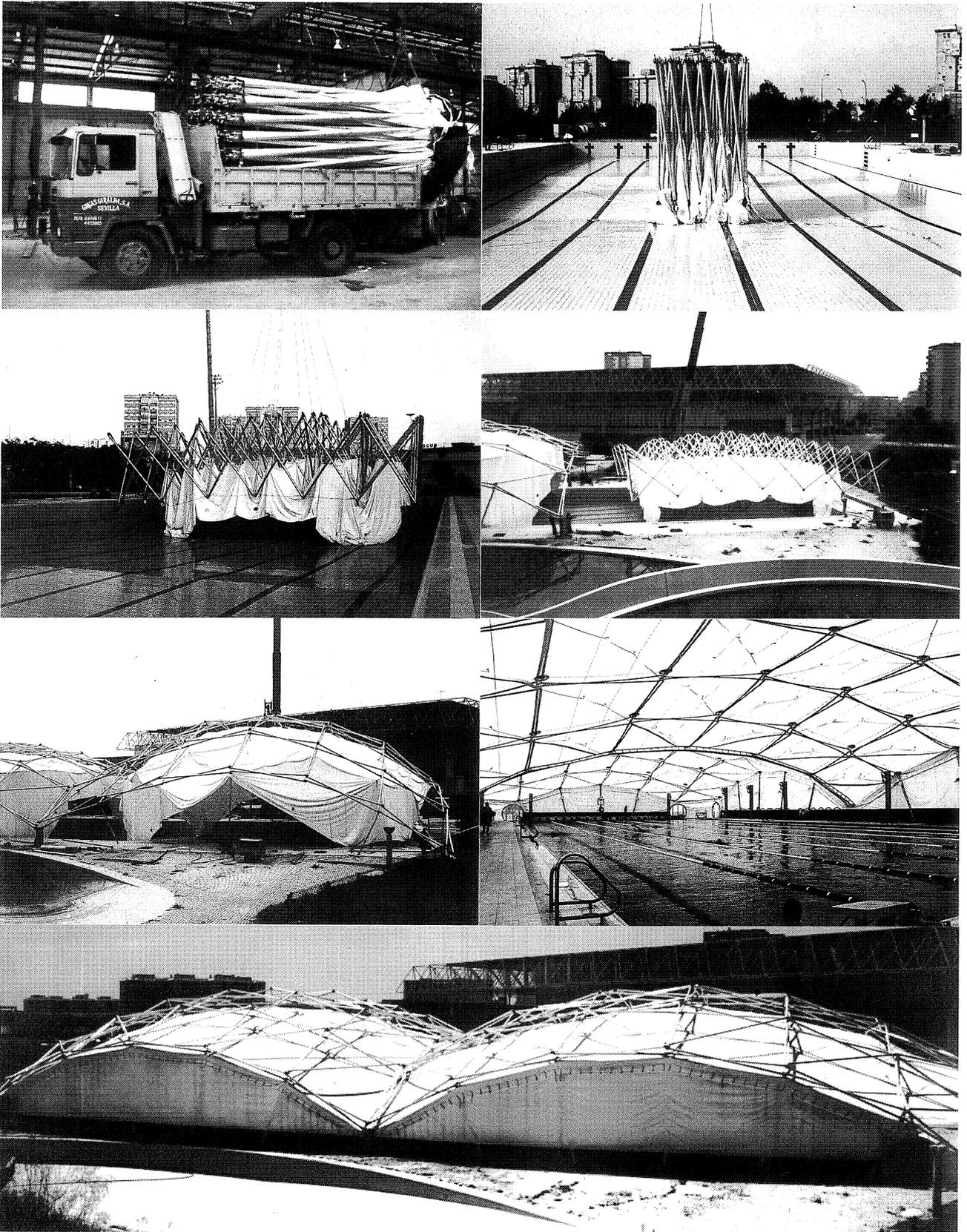


Fig. 9

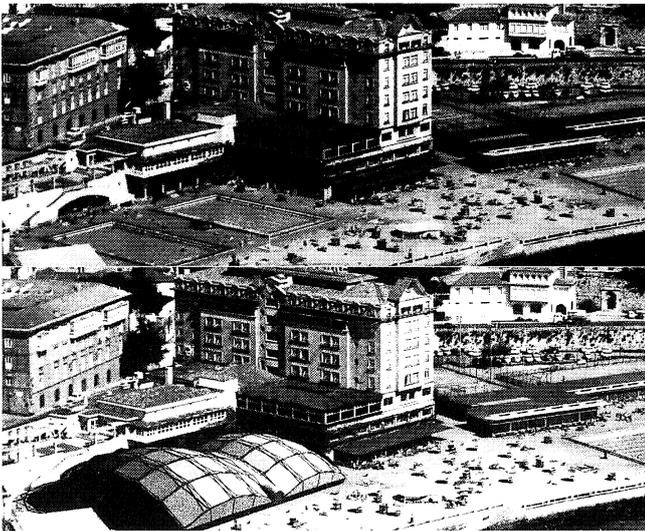


Fig. 10

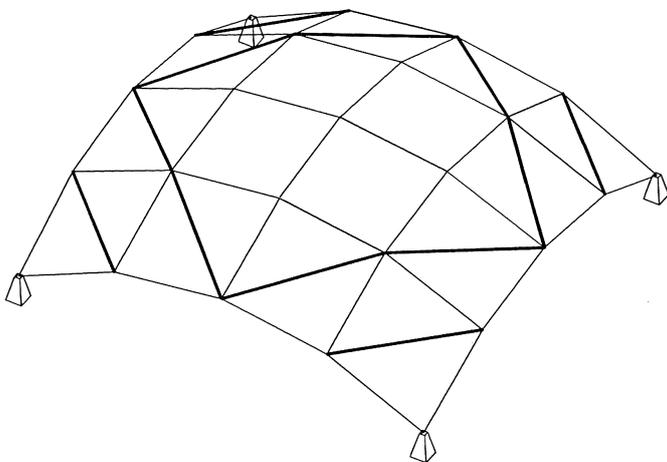
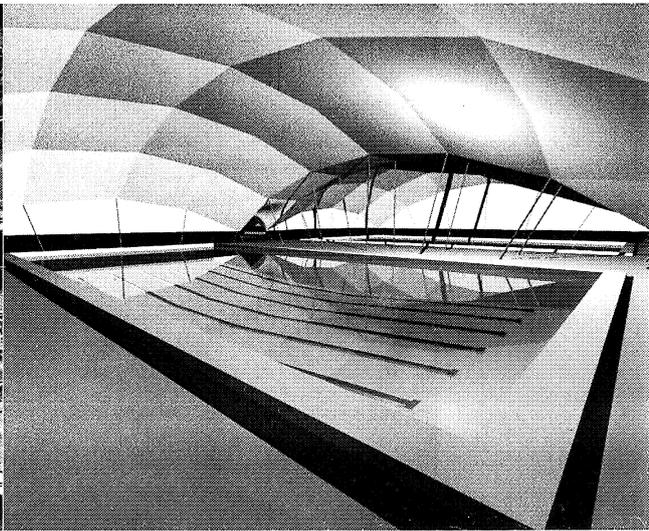


Fig. 11

El calentamiento adicional de apoyo sólo sería necesario en horas nocturnas en su caso.

5. SUPERFICIES ELÍPTICAS CON DIVISIÓN EN MERIDIANOS Y PARALELOS

La solución anterior ya ha resuelto todos los inconvenientes citados y parece difícilmente optimizable. Sin embargo, todavía nos encontramos que por tener secciones semicirculares la relación entre altura y la luz a salvar necesariamente es de 1/2.

Cuando la altura deba ser disminuida, por ejemplo cuando tenemos grandes luces, es necesario ir a formas elípticas que se basan en los mismos conceptos anteriores, aunque con una formulación bastante más complicada.

La figura 24 muestra esta solución que cuando quiere alargarse puede complementarse con un tramo cilíndrico de longitud variable.

La figura 25 desarrolla un modelo patentado planteado como una alternativa óptima que resuelve cualquier planta rectangular y alturas variables.

En este momento están en proyecto para ser construidas algunas de estas aplicaciones.

Nuevamente, como en el caso anterior se valora la posibilidad de ser izada sin necesidad de medios auxiliares mediante unos pequeños motores que van incorporados a la estructura.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. ESCRIG, F. & P. VALCÁRCEL. «Introducción a la geometría de Estructuras desplegables de barras». Boletín Académico de la ETSA de La Coruña. N.º 3. La Coruña, 1996.
2. HERNÁNDEZ, C. «Estructuras Transformables. ESTRAN I». Tecnología y Construcción, n.º 4- Caracas, 1988.
3. HERNÁNDEZ, C. & ZALEWSKI, W. «Deployable Structures». Rapidly Assembled Structures. Ed. P. S. Bulson. Computational Mechanics Pub. Southampton. U.K. 1991.
4. P. VALCÁRCEL, J. ESCRIG, F. & MARTIN, E. «Expandable Space Structures with Self-folding Textile Cover». Rapidly Assembled Structures. Ed. P.S. Bulson. Computational Mechanics Pub. Southampton. U.K. 1991.
5. CALATRAVA, S.; ESCRIG, F. & P. VALCÁRCEL, J. «Arquitectura Transformable». Fundación Centro de Fomento de Actividades Arquitectónicas. ETSA de Sevilla, 1993.
6. ESCRIG, F. & VALCÁRCEL, J. «Geometry of Expandable Space Bar Structures». Int. Journal of Space Structures. Multiscience Publishing Co. Ld. Vol. 8, n.º 1 y 2, 1993.
7. ESCRIG, F., P. VALCÁRCEL, J. & SÁNCHEZ, J. «Deployable Structures Squared in Plan. Design and Construction». Spatial Structures: Heritage, Present and Future. SGE. Ed. Padova, 1995.
8. ESCRIG, F. & VALCÁRCEL, J. & SÁNCHEZ, J. «La cubierta desplegable de la Piscina de San Pablo de Sevilla». Hormigón y Acero, n.º 199. Madrid, 1996.
9. ESCRIG, F.; P. VALCÁRCEL, J. & SÁNCHEZ, J. «MARAS'96. Mobile and Rapidly Assembled Structures Conference». Sevilla, 1996. Computational Mechanics Publ.

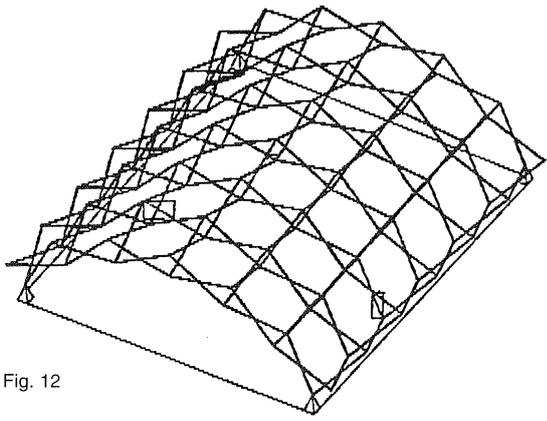


Fig. 12

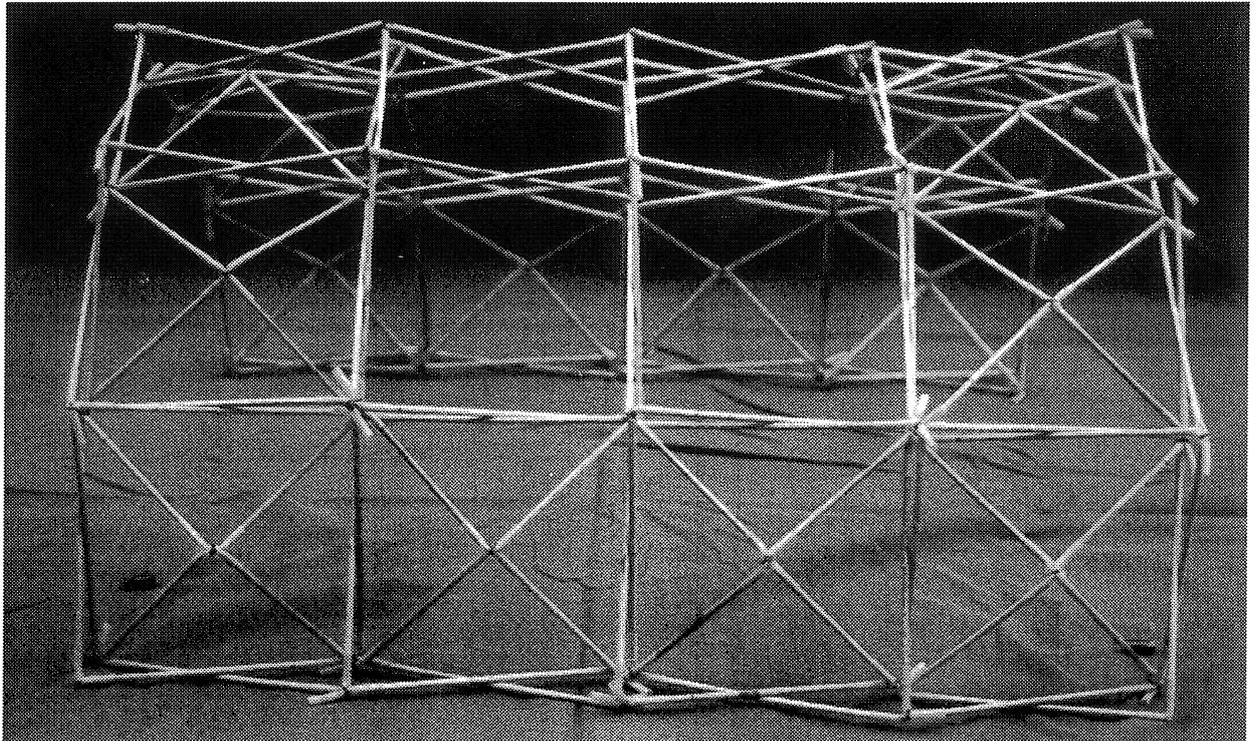
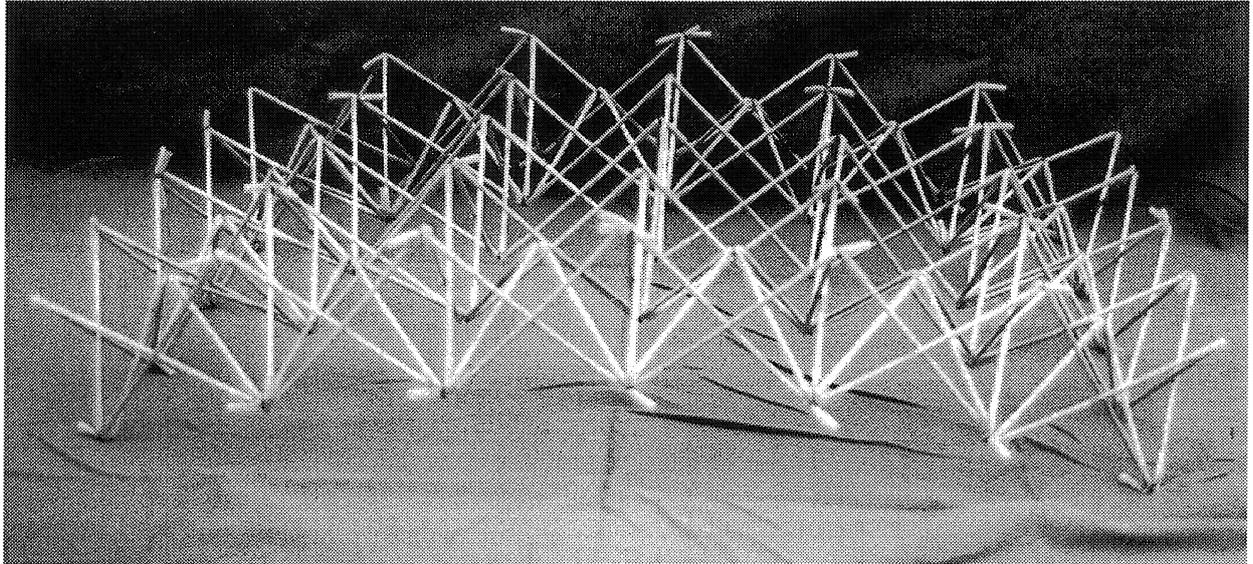
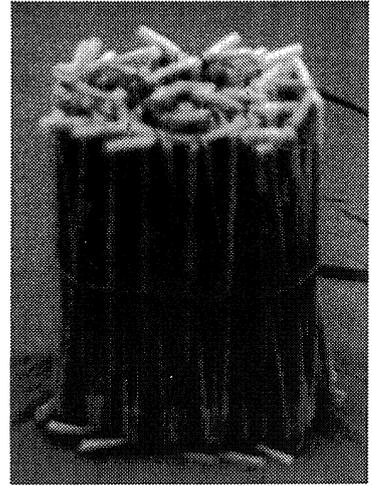


Fig. 13

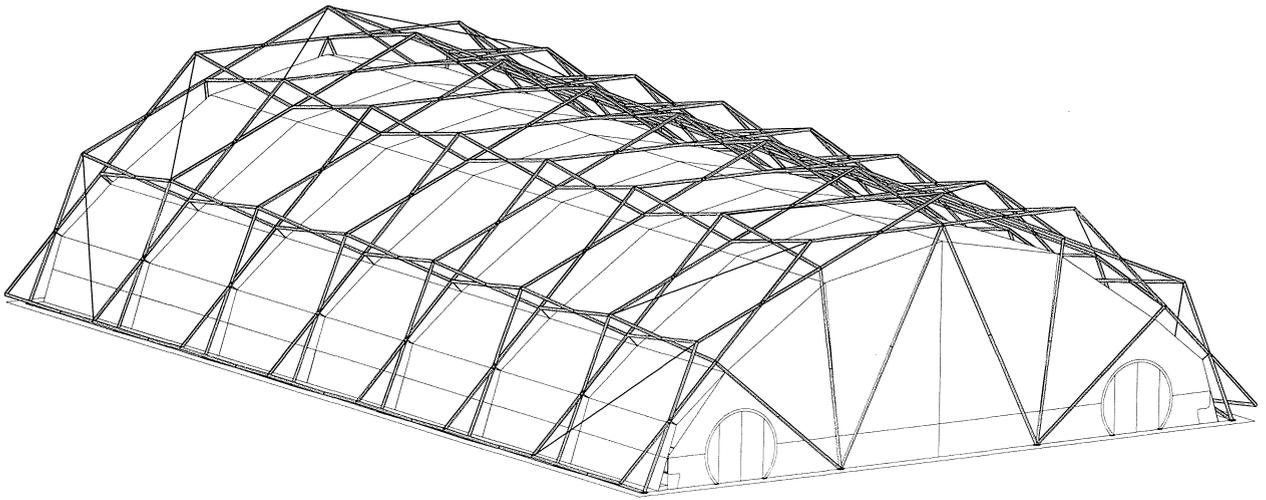


Fig. 14

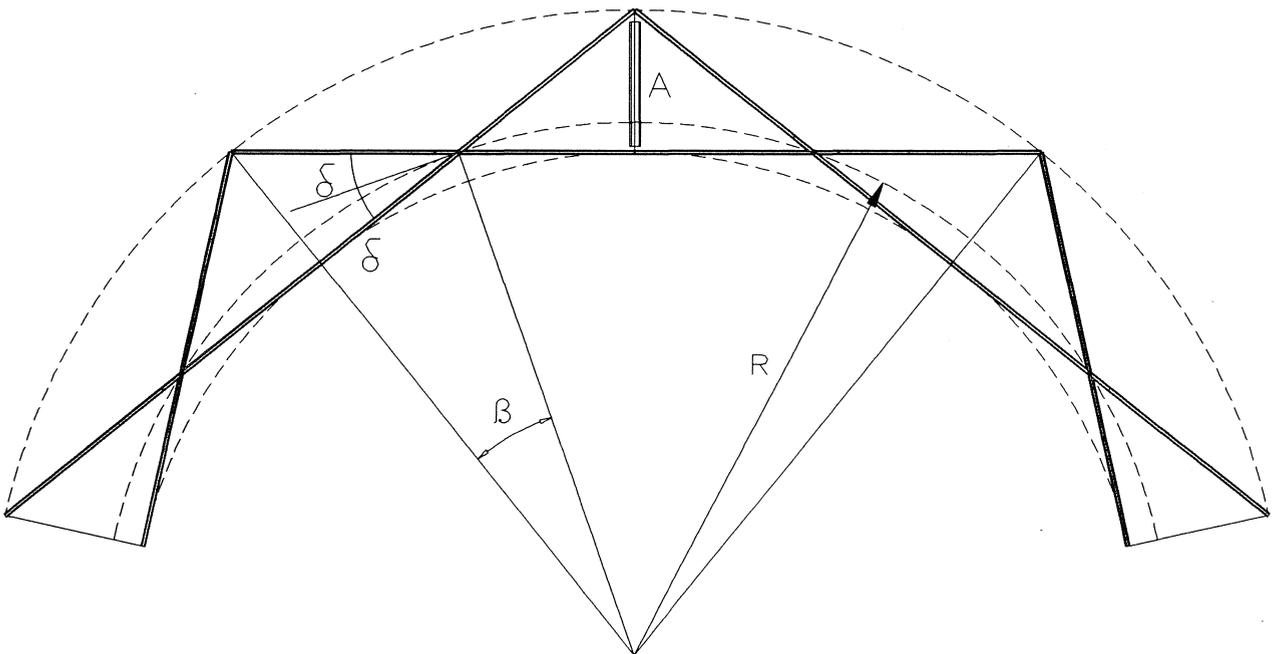


Fig. 15

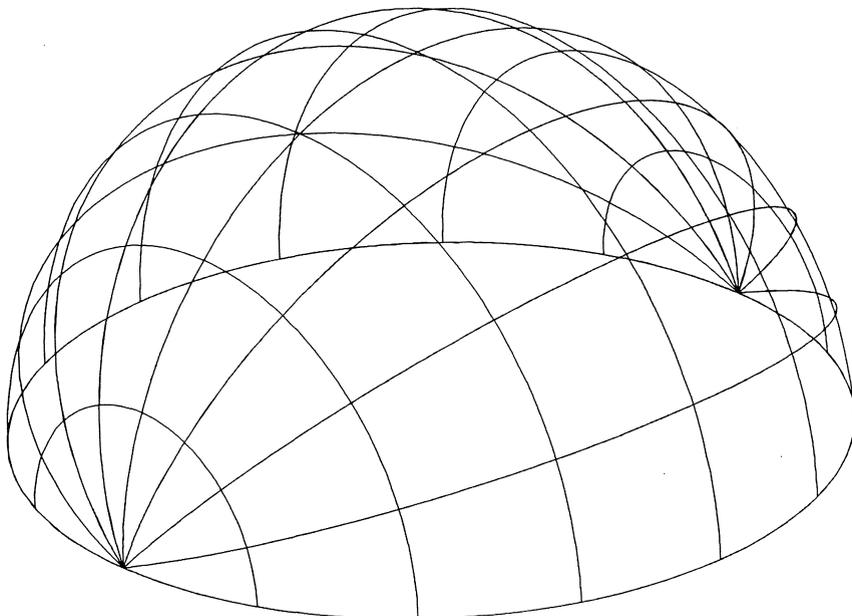


Fig. 16

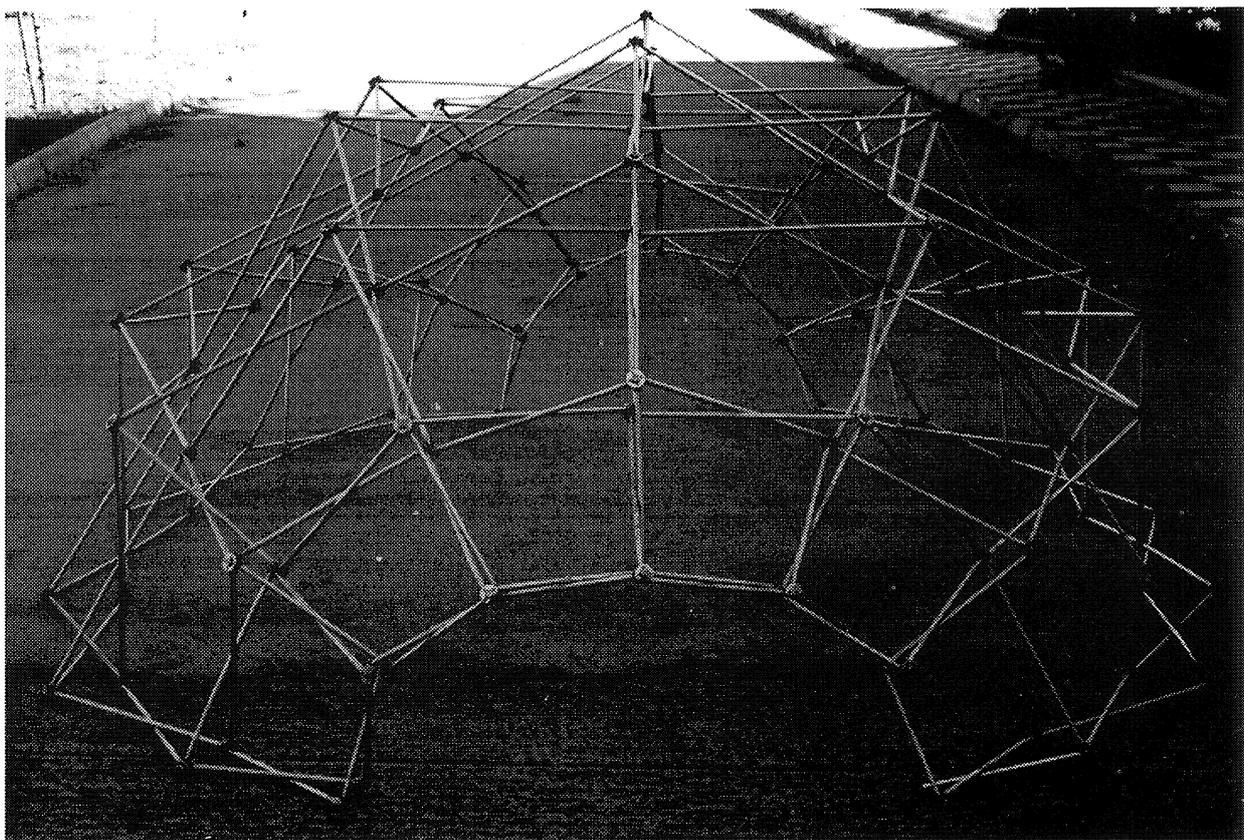
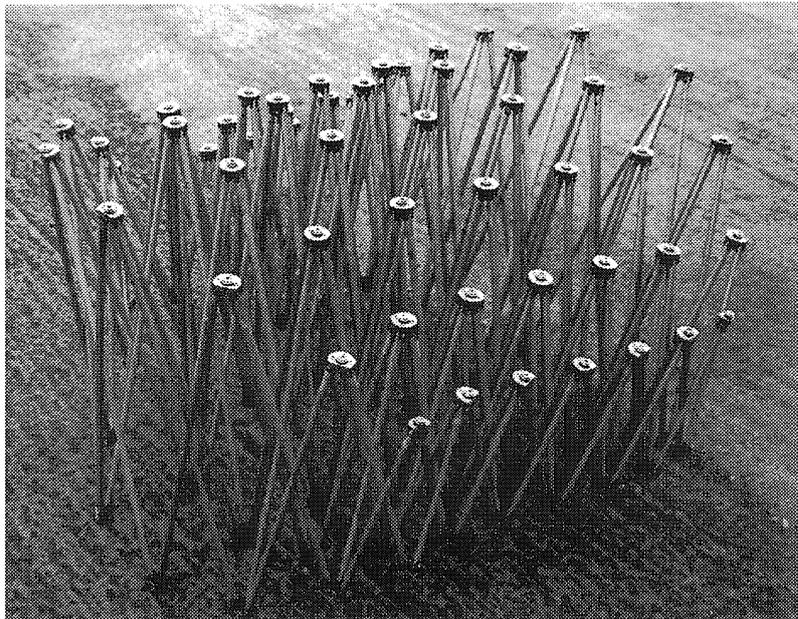
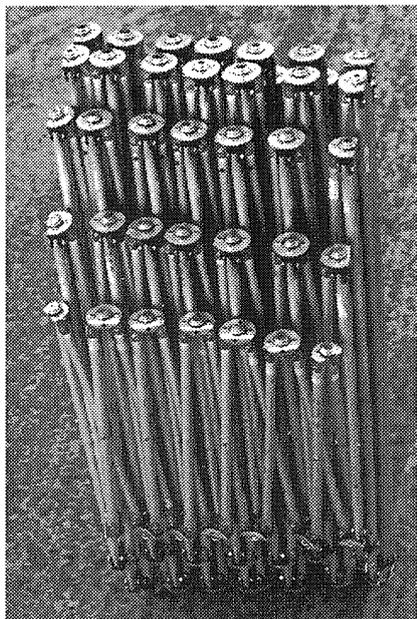


Fig. 17

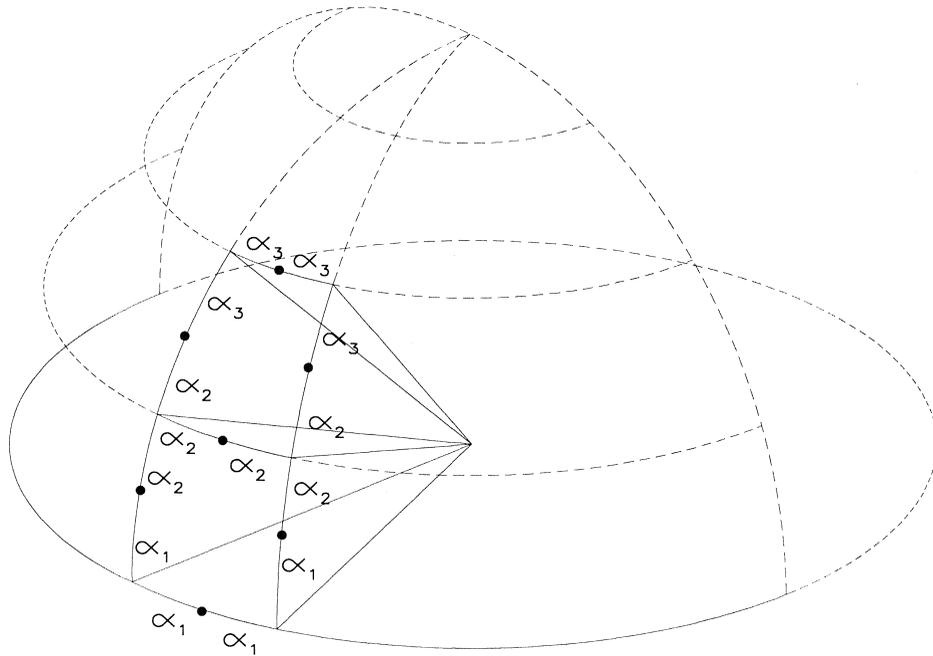


Fig. 18

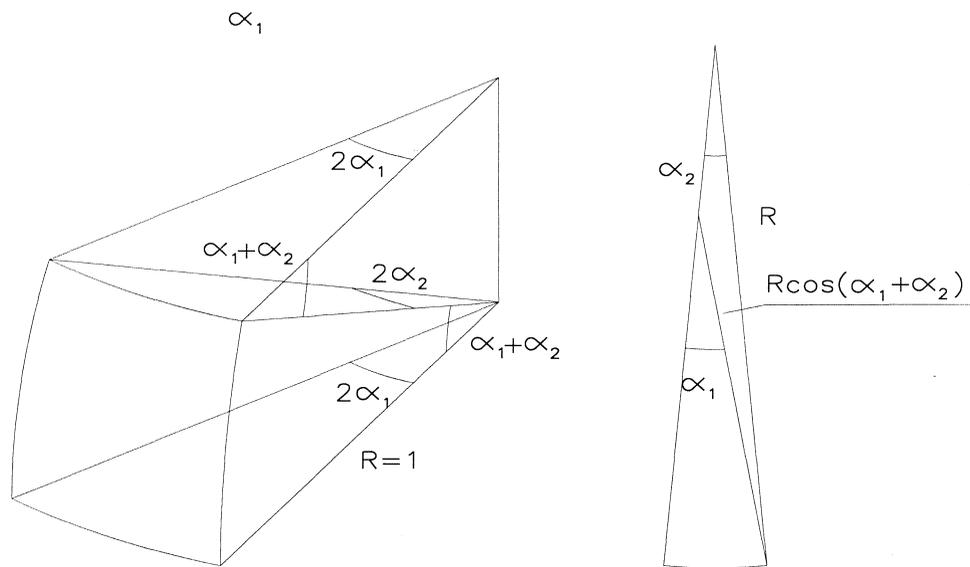


Fig. 19

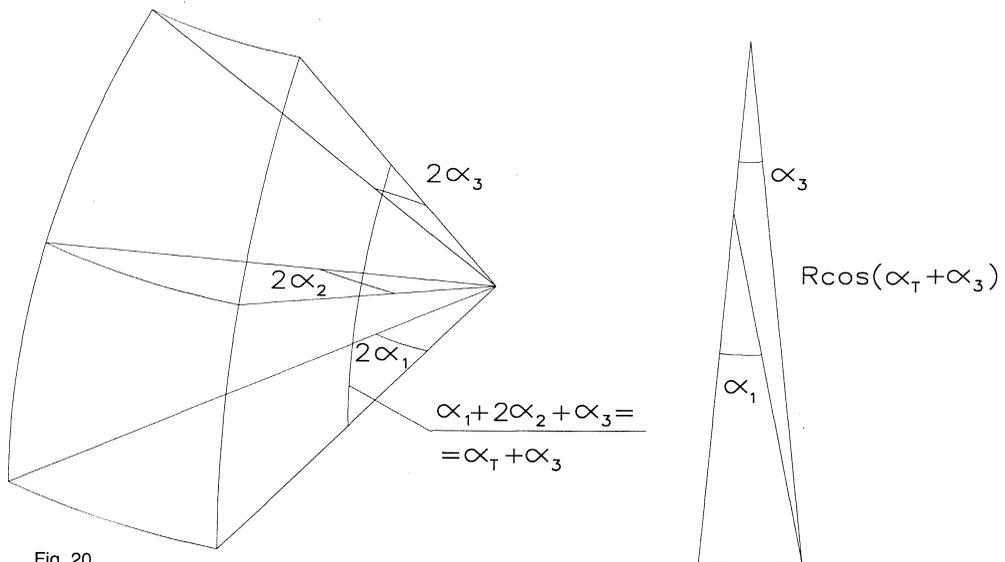


Fig. 20

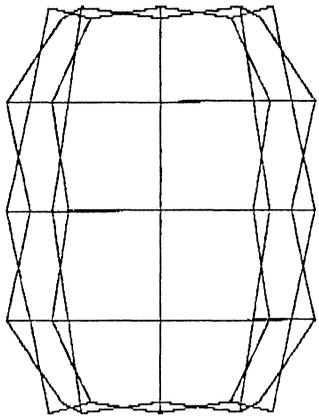


Fig. 21

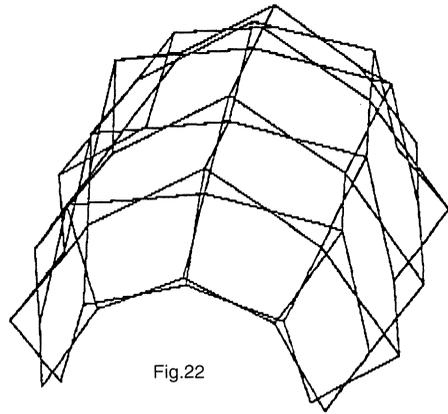


Fig. 22

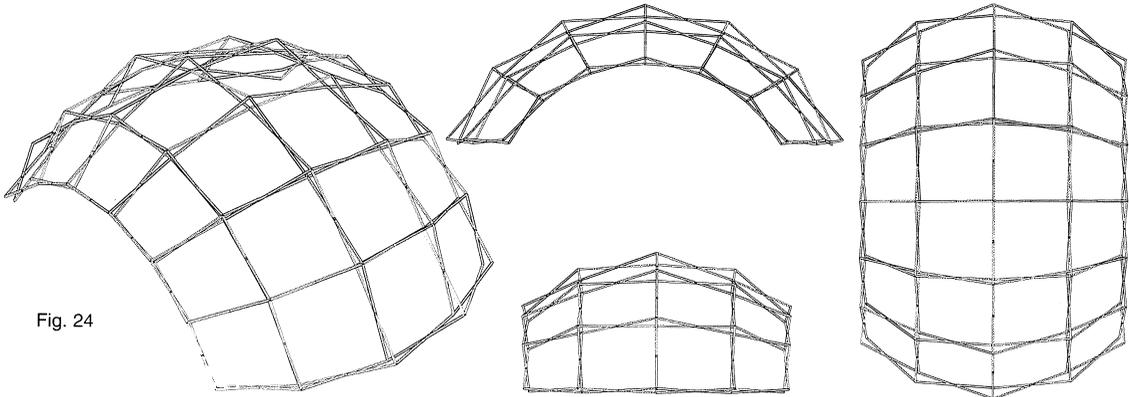


Fig. 24

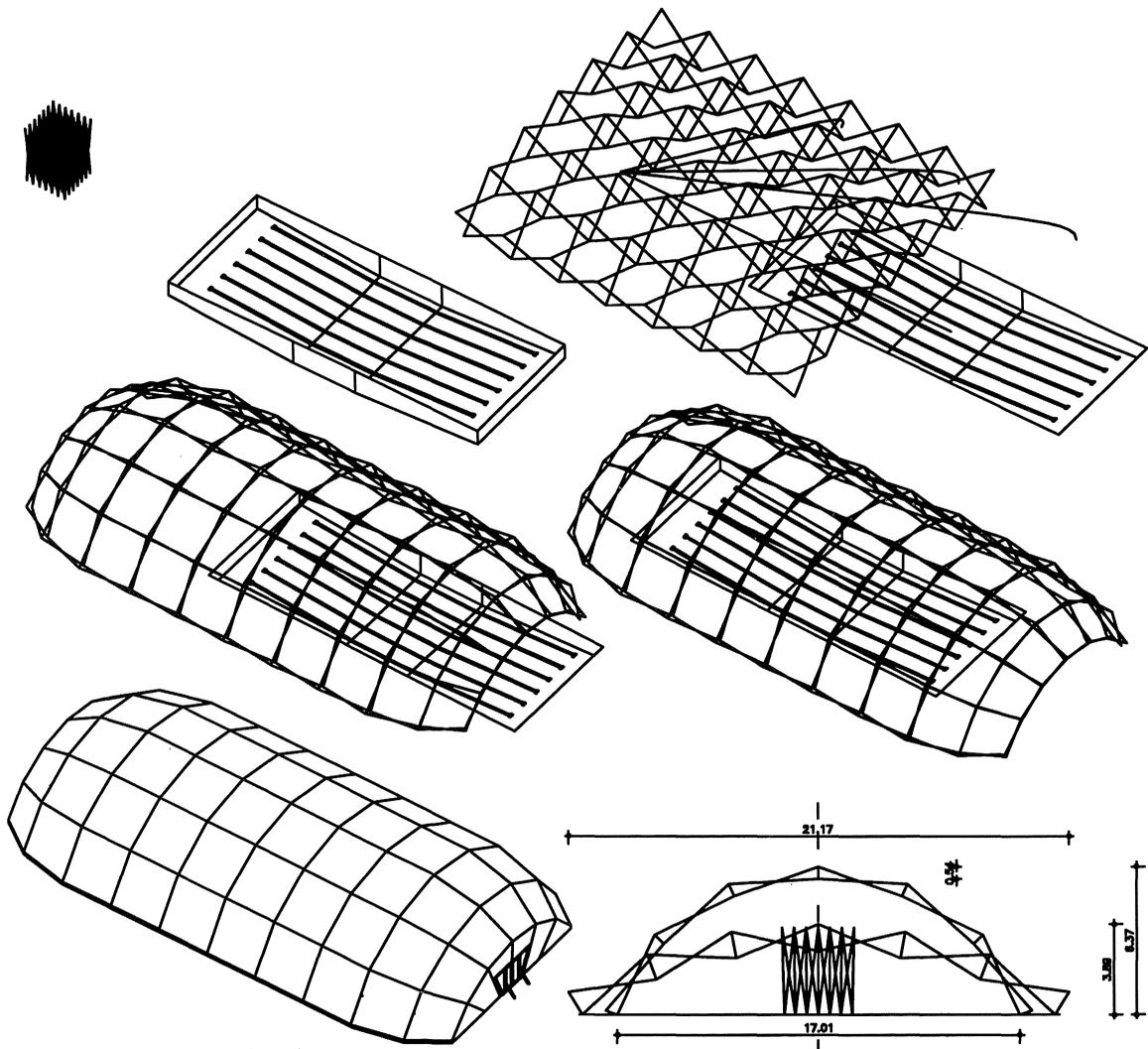


Fig. 25