

ESTRUCTURAS ESPACIALES: ENTRE LA IMAGINACION Y LA CRISIS

Por J. P. VALCARCEL

Departamento de Tecnología de la Construcción
E.T.S. Arquitectura. La Coruña

F. ESCRIG

Departamento de Estructuras E.T.S. Arquitectura.
Sevilla

Entre los días 5 y 10 de septiembre de 1993 se ha celebrado en la Universidad de Surrey el 4.º Congreso Internacional de Estructuras Espaciales, posiblemente el más importante del mundo en la especialidad. Por ello nos ha parecido que al hilo de lo visto en este Congreso podría ser un buen momento para una pequeña reflexión sobre este tipo de estructuras entre las que se pueden incluir muchas de las más espectaculares de todas las construidas.

Este Congreso se celebra con una periodicidad dilatada (el anterior se celebró en 1984) y por ello y por su prestigio internacional, es el punto de encuentro de los grandes especialistas mundiales y de los que se van incorporando a este mundo. Unos y otros presentan sus mejores realizaciones o sus ideas más brillantes,

en un ambiente que oscila entre la nostalgia de los encuentros entre los viejos maestros, la reverencia de quienes tienen ocasión de hablar personalmente con las celebridades mundiales, previamente conocidas y admiradas por sus trabajos y siempre la curiosidad por todas las ideas nuevas que puedan estimularnos en nuestro trabajo cotidiano.

Al Congreso se presentaron un total de 242 ponencias de 43 países distintos. La representación más numerosa fue la de Japón, como ya viene siendo habitual. En total 38 ponencias, que son buena muestra de su poderío tecnológico. Curiosamente ocupó el tercer lugar en número (a escasa distancia del segundo) la representación china, con un nivel tecnológico muy inferior, a veces sumamente anticuado, pero que indica bien a las claras su voluntad de

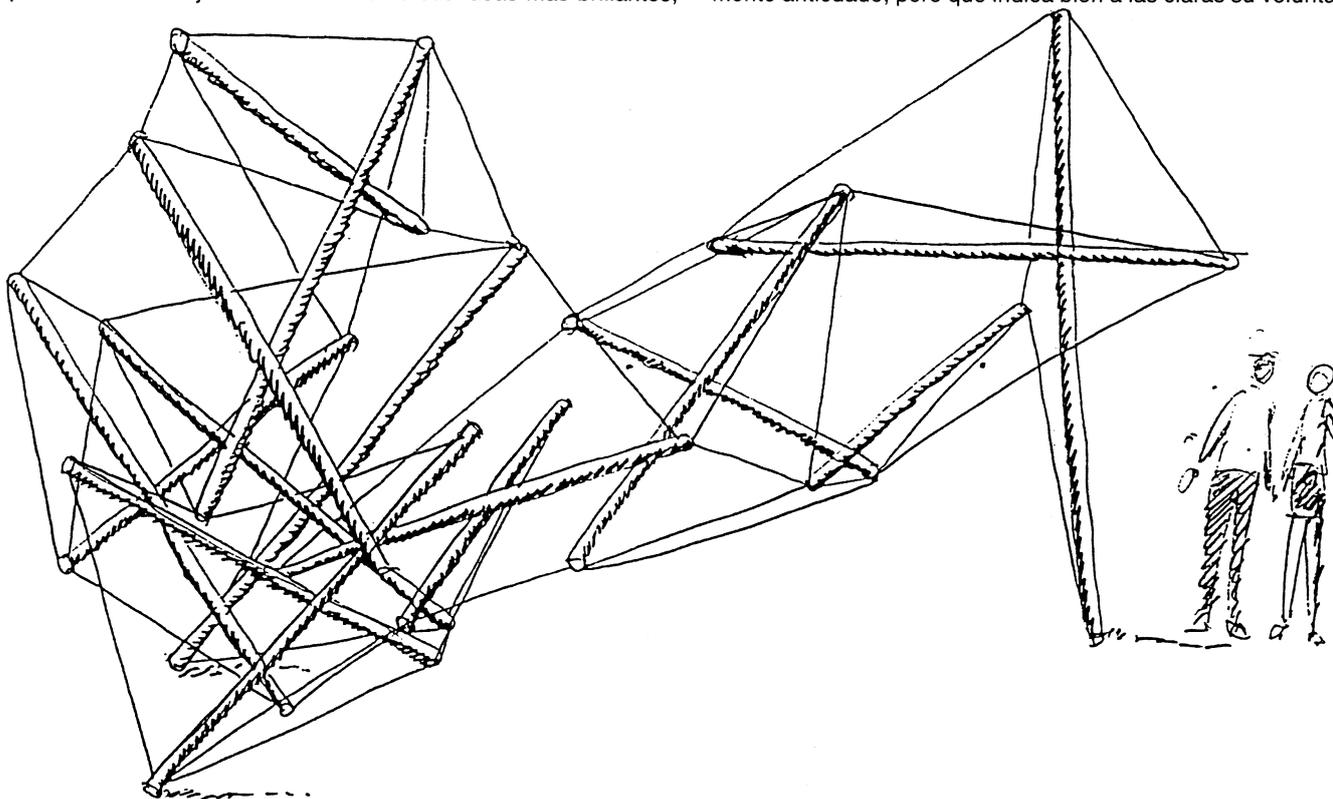


Fig. 1.—ESCULTURA DE KENET SNELSSON.

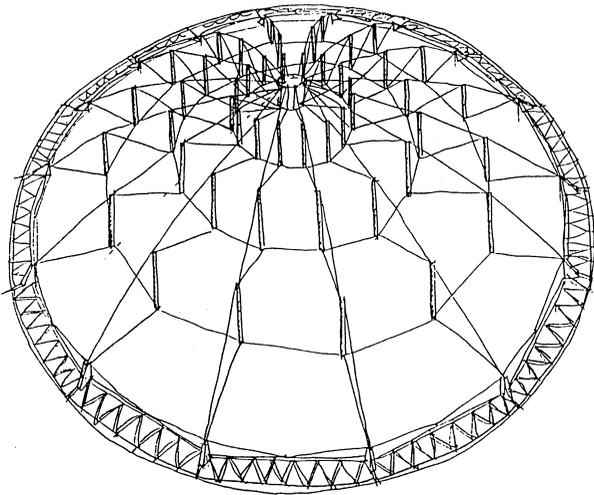


Fig. 2.—CUBIERTA DEL GIMNASIO DE LOS JUEGOS OLIMPICOS DE SEUL.

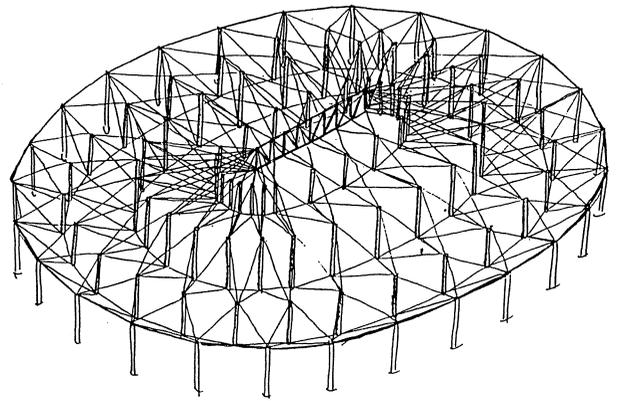


Fig. 4.—CUBIERTA DEL PROYECTO ORIGINAL DEL EDIFICIO EXPO (NO REALIZADA).

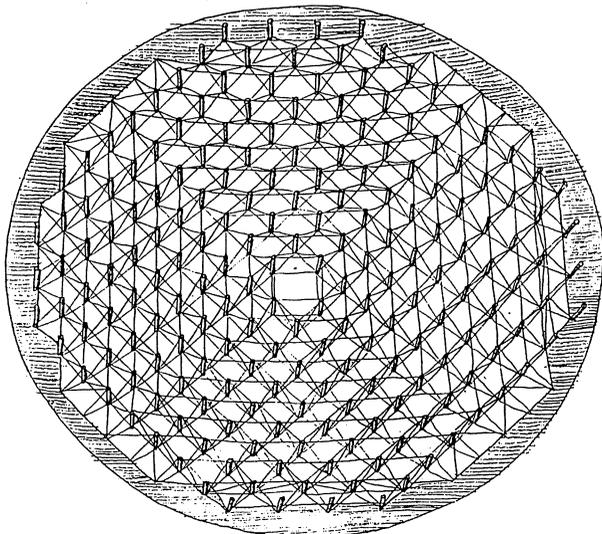


Fig. 3.—CUBIERTA DEL ESTADIO OLIMPICO DE ATLANTA.

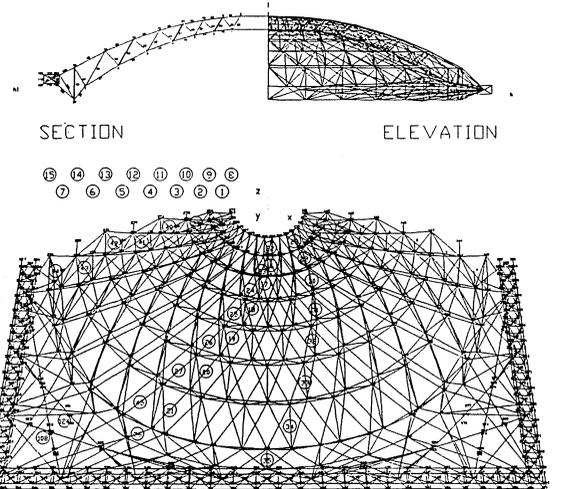


Fig. 5.—CUPULA AUTOTENSADA SOBRE PLANTA CUADRADA.

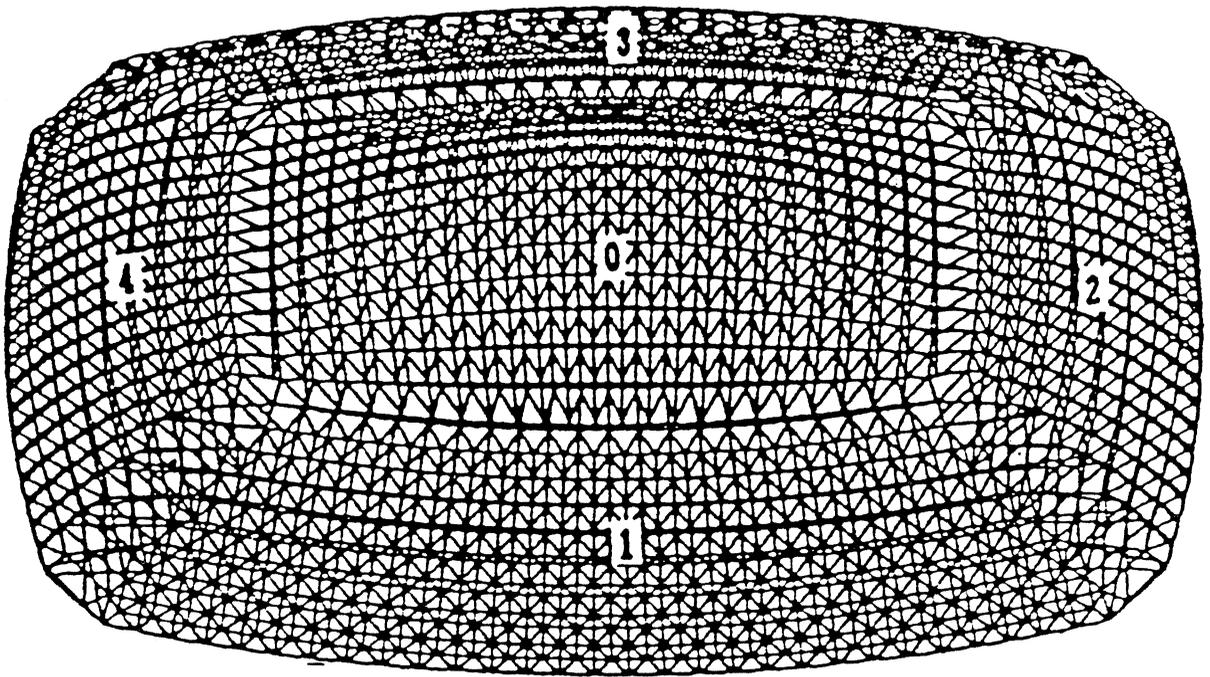


Fig. 6.—CUPULA DE DOBLE CAPA. PALAU SANT JORDI. JUEGOS OLIMPICOS DE BARCELONA.

aprender con la misma estrategia que empleó Japón en su momento. A lo largo del Congreso fue sumamente pintoresco el constante fusilamiento fotográfico de las diapositivas interesantes a cargo del oriental de turno, lo que llegó a niveles de broma colectiva.

ESTRUCTURAS AUTOTENSADAS

Sin duda alguna las grandes vedettes de este Congreso fueron las estructuras autotensadas (tensegrities) que han protagonizado en los últimos tiempos una curiosa y sorprendente historia del patito feo. Las estructuras autotensadas, es decir, aquellas formadas por un conjunto de barras sujetas a compresión, unidas por cables que se tensan para equilibrar el conjunto, han carecido de toda utilidad práctica a lo largo de los últimos treinta años. Se han realizado todo tipo de esculturas o pequeños elementos decorativos, pero ni el propio Fuller consiguió darles utilidad arquitectónica. Y así han arrastrado una vida lánguida de congreso en congreso, estudiadas por un escaso número de enamorados, sin que los demás las vieran más que como simples curiosidades plásticas (fig. 1).

Sin embargo, recientes realizaciones como las cubiertas de los pabellones de Gimnasia y Lucha para los Juegos Olímpicos de Seúl (fig. 2) de Geiger o el estadio olímpico de Atlanta de Levy (fig. 3) han producido un enorme salto cualitativo, de tal magnitud que en este momento son las estructuras que han permitido levantar algunas de las cubiertas más espectaculares y de mayor dimensión. Sin embargo es notoria la desconfianza de muchos técnicos en las posibilidades del sistema y en este sentido puede ser ilustrativo lo sucedido con la cubierta del Edificio Expo, diseñado por Vázquez de Castro.

Dicha cubierta estaba formada por un sistema autotensado en el que, tal vez para no emplear la patente de Geiger se utilizaba un doble anillo inferior de cables (fig. 4). Las barras comprimidas estaban huecas y por ellas podían deslizarse unas palmeras artificiales, que permitían sombrear el recinto.

El sistema estructural, sin ser óptimo, era desde luego correcto, pero por razones que no han trascendido y posiblemente más ligadas a las palmeras que a los cables, la empresa constructora presionó fuertemente y la cubierta fue sustituida por una pirámide truncada de perfiles metálicos, más convencional.

En este Congreso se estudiaron con bastante profundidad las estructuras autotensadas y fue, como se ha señalado, uno de los puntos de mayor interés. Sin embargo el tema comenzó en forma polémica cuando uno de los antiguos estudiosos del tema, Hanaor, presentó una clasificación de la que excluía precisamente a los sistemas más efectivos. Hubo bastantes propuestas teóricas perdidas en la línea escultórica y pocas novedades reales. De las propuestas creo que merece destacarse la del serbio Nestorovic con una solución de puntales comprimidos inclinados, que permite reducir el gran canto habitual en estas estructuras. Además solucionaba de forma bastante ingeniosa el paso de la planta cuadrada a la circular. Con todo esta propuesta despertó escaso interés, debido en parte al inglés en el que fue expuesta (fig. 5).

MALLAS DE DOBLE CAPA

En el campo de las estructuras espaciales de doble capa de barras (fig. 6) hemos asistido a una etapa de fuerte consolidación teórica, al tiempo que las ideas nuevas en el diseño han sido en general poco notorias. El eje central de muchas intervenciones han sido los problemas de los nudos. Desde hace varios años la extinción de la patente del sistema Mero ha provocado una auténtica hiperinflación de los sistemas de nudos basados en él, lo que ha provocado la irónica intervención del representante de Mero, quien ha agradecido públicamente a sus competidores el haberle copiado el nudo, con lo que desmataban la calidad del diseñador original. En las figuras pueden observarse algunos de los nudos que se expusieron en el Congreso (figuras 7, 8, 9).

Esta situación y el deseo de muchos fabricantes de apartarse de la línea del nudo esférico macizo, característica del sistema Mero, ha llevado a diseñar nudos de muy escasa rigidez que han presentado problemas de pandeo local o de pandeo torsional. Los estudios teóricos y experimentales que se han presentado han sido muy numerosos. Así el estudio de los fenómenos de torsión y flexión en nudos (Ogawa, Suzuki, Taniguchi), efectos de imperfecciones en las barras (Tada), incluso aleatorias (Bacco). También

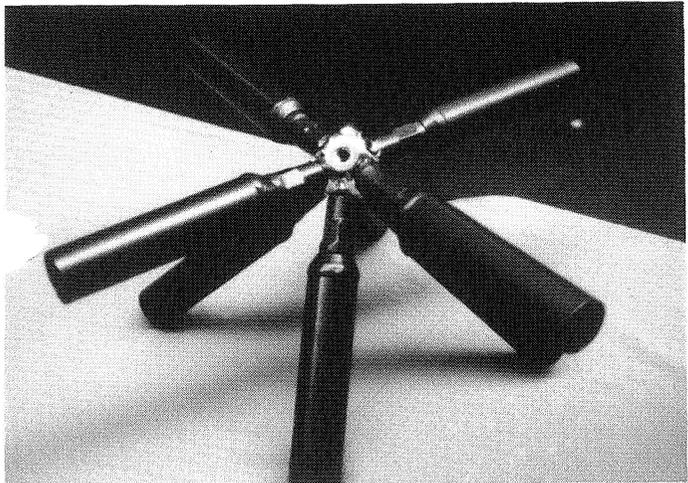


Fig. 7.—NUDO SISTEMA ORONA.

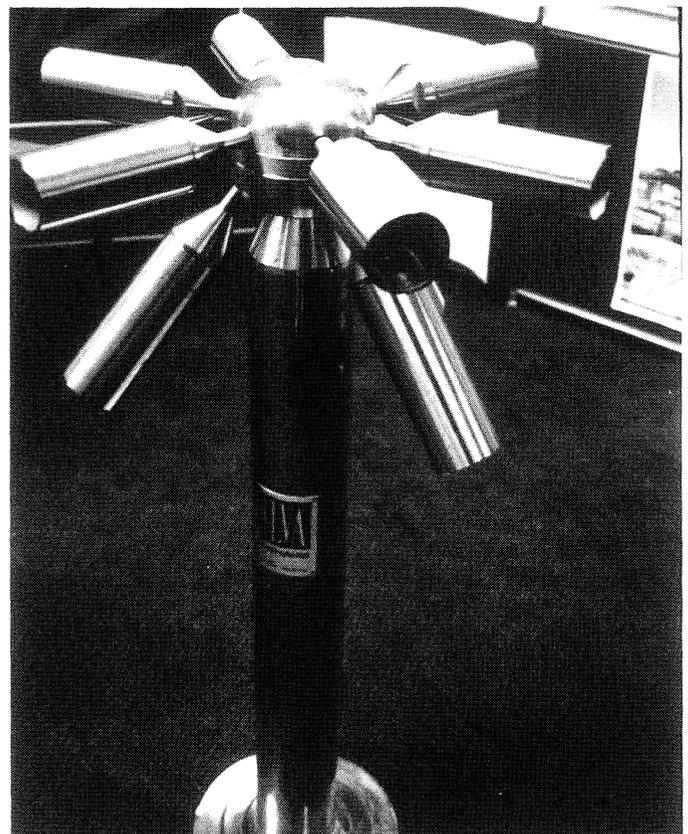


Fig. 8.—NUDO SISTEMA VESTRUT DE ILVA.

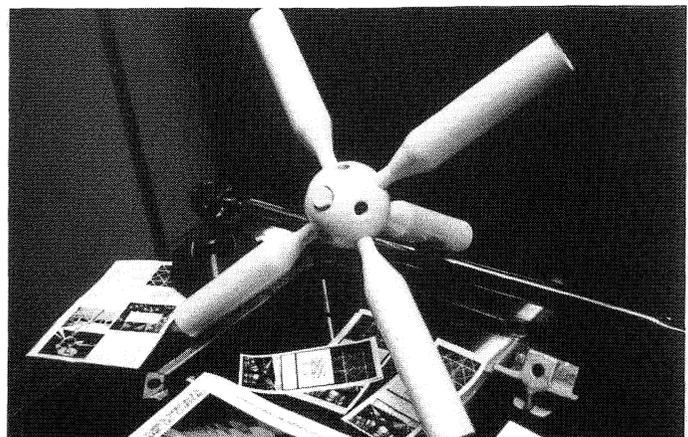


Fig. 9.—NUDO SISTEMA SPHEROBAT DE DU CHAETU.

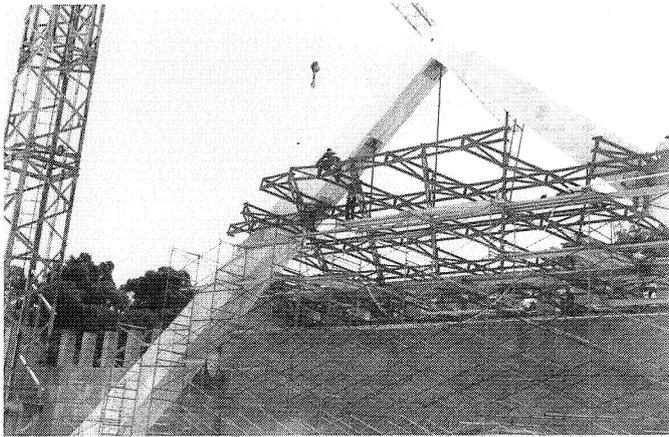


Fig. 10.—CUBIERTA DEL AUDITORIO DE LA RABIDA (ALVAREZ CHECA Y ESCRIG).



Fig. 11.—MÓDULOS ENSAMBLABLES DE LA CUBIERTA DEL AUDITORIO DE LA RABIDA.

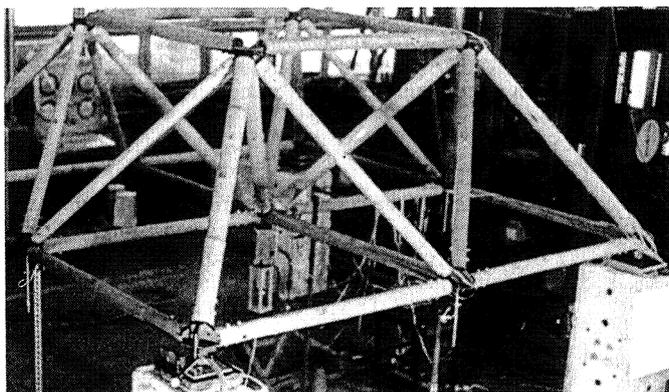


Fig. 12.—MALLAS ESPACIALES DE BAMBU (GHAVAMI Y MOREIRA).

se ha propuesto un nuevo sistema de barras no rígidas (soft) que presentó Parke.

La única ponencia que salió del esquema barra-nudo fue la presentada por los autores sobre estructuras formadas por módulos ensamblables, lo que permite interesantes posibilidades para el desarrollo de las mallas espaciales (figuras 10, 11).

Los estudios sobre el comportamiento de postpandeo y el colapso de mallas de doble capa han sido muy numerosos (Schmidt, Saka, etc.). En este aspecto ha sido de gran interés la exposición del gran especialista Schmidt, uno de los históricos, quien mostró interesantes resultados experimentales, con un modelo teórico relativamente alejado de los comportamientos reales. Esto nos ha permitido constatar con la natural satisfacción que el modelo propuesto por J. Estévez en su tesis doctoral, leída en esta Escuela hace ya tres años, es en el momento actual el más preciso de los que se están empleando.

En cuanto a las novedades en lo referente a nuevos materiales, se esperaba más de los composites y de las fibras, que sólo ocuparon algunas ponencias sin una relevancia especial. Sin embargo despertaron gran interés las estructuras de bambú presentadas por el brasileño Ghavami (fig. 12) y las diseñadas por un equipo de esta Escuela dirigido por J. Estévez (fig. 13). Ambas ponencias fueron muy bien recibidas e incluso fueron citadas por el profesor Schmidt en el resumen final del Congreso.

Por último, reseñar la curiosa aplicación de las estructuras de doble capa a la escultura con el Starman, un monumento escultórico en Filadelfia (fig. 14).

MALLAS DE UNA CAPA

Las estructuras de barras formadas por una sola capa han recibido una gran atención teórica, que contrasta con las escasas realizaciones presentadas. Los temas han sido similares a los de las mallas de dos capas, como pueden ser los efectos de imperfecciones de barras (Trentadue, Zhao, etc.) o los de imperfecciones aleatorias (Sadiq). Pero sobre todo se ha abordado con gran rigor el estudio del principal problema de estas mallas que es el pandeo, tanto local como generalizado. Fue estudiado tanto a nivel teórico, como experimental en numerosas comunicaciones (Giönn, Matsushita, Eriksson, Veki, Sumec, Shibata, Fujimoto, etc.).

Como en la mayor parte de los congresos el análisis dinámico fue objeto de muchas ponencias, casi siempre realizadas por japoneses o chinos, muy sensibilizados por los problemas sísmicos de sus países (Ishikawa, Karamanos, Nakamura, Kunieda, etc.).

En cuanto a las realizaciones apenas se ha presentado alguna. En los últimos tiempos y en la medida que avanzan los recursos de cálculo, parece disminuir el interés por este tipo de estructuras, cuyo comportamiento es sin duda muy complejo. Puede destacarse el Palacio de los Deportes de Bolonia, formado por un entramado de vigas de madera laminada (fig. 15).

ESTRUCTURAS DE CABLES Y MEMBRANAS

Tras el enorme éxito de este tipo de estructuras en la EXPO'92 parece que los diseñadores han tomado un cierto respiro y apenas se han presentado novedades sobre lo visto en Sevilla, que desde luego fue recordado en varias ponencias. Sobre el tema se han presentado algunas comunicaciones, en general teóricas. En cuanto a realizaciones fue interesante el planteamiento de Hoppe para cubrir las ruinas de Éfeso y Carnutum con un sistema de membranas tensadas con cables, que en cierto modo recordaban el planteamiento del Palenque de la EXPO. Fue curiosa la presentación de la ponencia por el arquitecto, lo que provocó una gran discusión con algunos ingenieros, poco conformes con el escaso alabeo de las membranas (fig. 16).

Los alemanes presentaron algunos ejemplos de estructuras de membrana tensada por elementos metálicos. Fueron muy interesantes las ponencias sobre los pabellones de exposiciones temporales de Düsseldorf y Munich formados por membranas tensadas sobre bastidores de malla espacial metálica (fig. 17). También fue muy interesante la exposición de Bergermann sobre la cubierta del Neckarstadion de Stuttgart formada por un conjunto de cables que se tensan sobre un anillo perimetral, lo que forma la primera estructura resistente que es autotensada. Sobre ella se colocan una serie de arcos metálicos, cuya función es tensar la membrana de cubierta. En la figura 18 puede verse un esquema de la cubierta, puesto que no fue posible obtener mejor documentación.

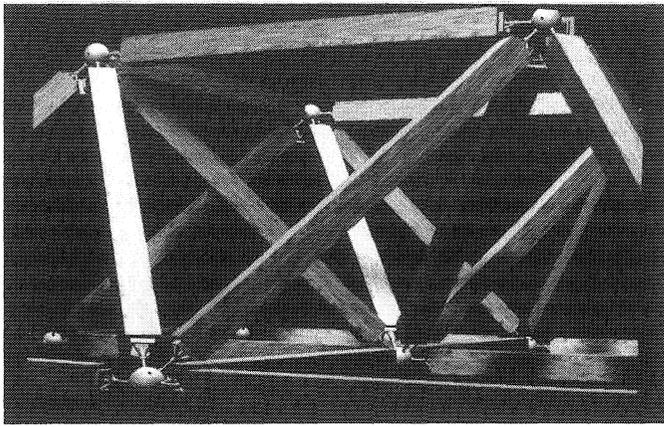


Fig. 13.—MALLAS ESPACIALES DE TUBOS DE MADERA LAMINADA (ESTEVEZ, PABLOS, MUÑIZ, FREIRE, VAZQUEZ, ALVAREZ-ILARRI).



Fig. 14.—STARMAN FILADELFIA.

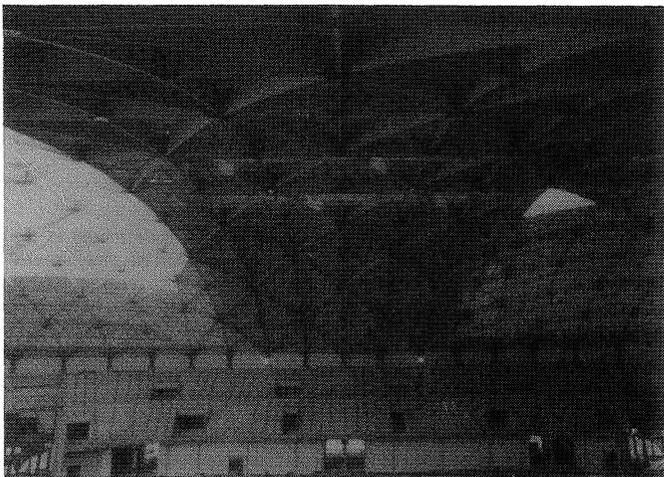


Fig. 15.—VISTA INTERIOR DEL PALACIO DE LOS DEPORTES DE BOLONIA.

ESTRUCTURAS DESPLEGABLES

Este tema resultaba especialmente grato a los autores de este artículo, puesto que en el Congreso nos dimos cita prácticamente todos los que estamos trabajando en el tema en todo el mundo. El resultado final estuvo entre la satisfacción y la decepción. Satisfacción puesto que pudimos constatar que los españoles estamos llevando a cabo las propuestas más avanzadas y decepción por la ausencia de novedades significativas.

Un tema del que se esperaba algún avance era el de los anillos desplegables, propuestos por Hobermann (fig. 19). Pellegrino presentó una propuesta similar con un estudio detallado de las condiciones de desplegabilidad, pero los importantes problemas de comportamiento resistente de este tipo de estructuras siguen sin abordarse. Más interesante fue su propuesta para un mástil desplegable para usos espaciales.

Gantes presentó una clasificación bastante completa de las estructuras desplegables y Shan presentó una formulación formex de algunas estructuras muy elementales. Las formulaciones formex se mencionarán en el capítulo de morfología estructural y son un posible camino para la resolución de algunos problemas de gran complejidad, pero por el momento no parece que el desarrollo alcanzado sea suficiente.

Desde nuestro punto de vista, necesariamente poco imparcial, las aportaciones más interesantes fueron la ponencia de K. Kawaguchi sobre estructuras colapsables (fig. 20) y la nuestra sobre sistemas de cubrición de estructuras desplegables con chapas rígidas (fig. 21).

Mención aparte merece el Pabellón de Venezuela formado por un conjunto desplegable de vigas trianguladas y presentado por Hernández Merchán, que es hasta el presente el único ejemplo realmente construido de estructuras desplegables desde Pérez Piñero (fig. 22).

ESTRUCTURAS MOVILES

Algunas espectaculares y recientes edificaciones como el Skydome de Toronto han puesto de nuevo de moda las cubiertas móviles. En este Congreso la presencia de estas estructuras ha sido reducida y sólo pueden mencionarse las ponencias de Maki y Hori sobre una cubierta móvil de sectores (fig. 23).

MORFOLOGIA ESTRUCTURAL

La reciente creación de un grupo de trabajo de la IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) sobre morfología estructural, es decir, de los elementos morfológicos básicos de las estructuras, ha provocado una gran cantidad de comunicaciones sobre diversos aspectos tales como generación de mallas, poliedros, aspectos de modulación, etc.

Uno de los aspectos destacados fueron los problemas de generación geométrica de estas estructuras para su tratamiento en ordenador. Este es un tema de fuerte actualidad y que en la Universidad de Surrey es inevitable por la presencia del profesor Nooshin, inventor del álgebra formex. Este es un sistema algebraico que es base de un lenguaje de programación para la generación automática de mallas espaciales de barras, en principio sin limitación de tipos. Este lenguaje es de gran potencia y concisión y permite generar formas realmente complejas (fig. 24), pero tiene el inconveniente de que resulta bastante crítico para los no iniciados. En todo caso parece un prometedor camino. En este Congreso se presentaron numerosas comunicaciones sobre diversos aspectos del álgebra y del lenguaje formex (Nooshin, Oshiro, Yamada, Maaleek, Osman, etc.).

Además del tratamiento formex se presentaron otras ponencias estudiando diversos aspectos de generación de mallas por métodos geométricos (Kolosowski, Sánchez-Alvarez).

El estudio de los poliedros es objeto de numerosos equipos de investigación en todo el mundo. En este Congreso se dieron cita los mayores especialistas del tema, lo que dio origen a numerosas ponencias, que fueron desde los aspectos básicos de generación (Huybers) o clasificación (Meurant y Lalvani) a las propuestas de Gabriel quien desde hace muchos años viene proponiendo unidades de habitación integradas en mallas espaciales. Con todo no parece que las personas estén dispuestas a vivir dentro de una estructura espacial y estas propuestas no acaban de salir de la teoría.



Fig. 4. Elevation view.

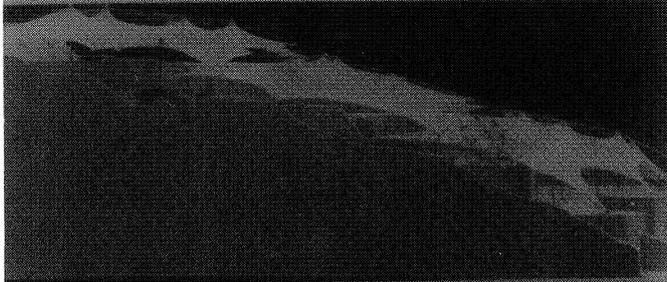


Fig. 5. Sectional view.

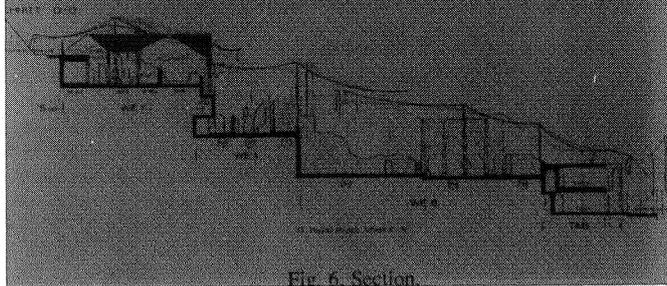


Fig. 6. Section.

Fig. 16.—CUBIERTA PARA LAS RUINAS DE EFESO (HOPPE).

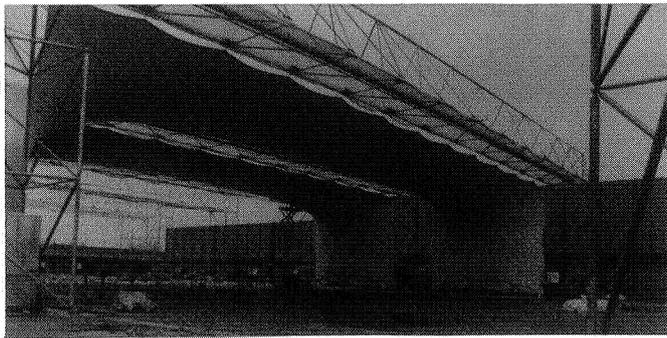
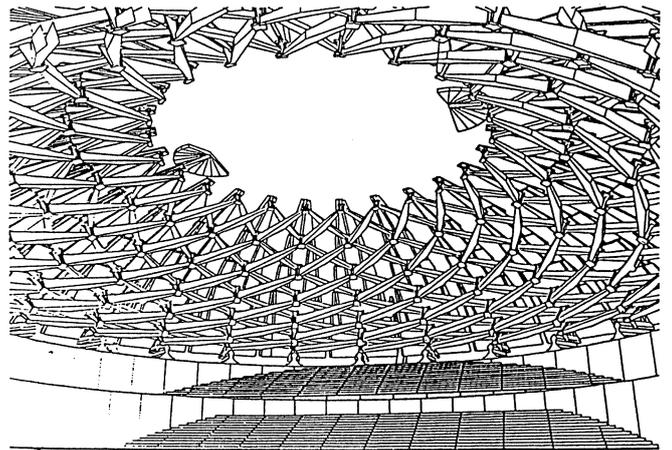
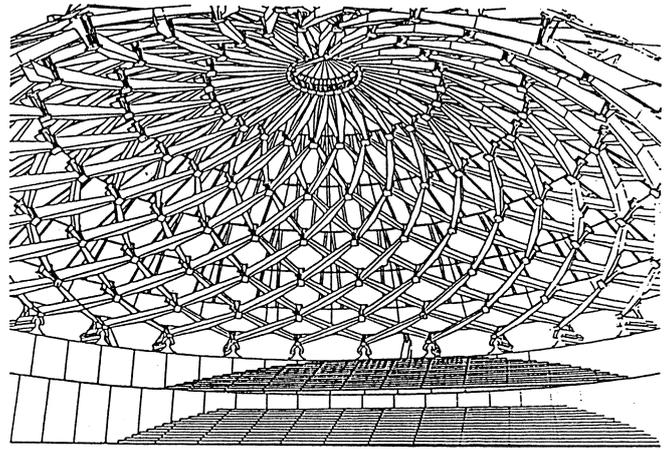


Fig. 17.—CUBIERTA PAR UN LOCAL DE EXPOSICIONES EN DÜSSELDORF (KLIEM).

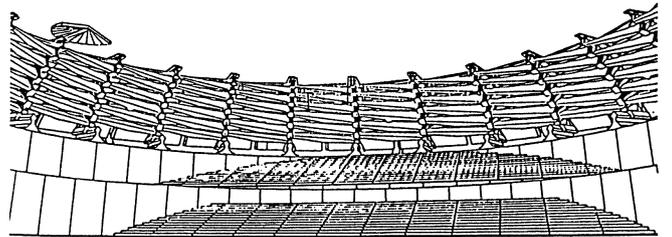


Fig. 19.—DISEÑO DE HOBBERMAN PARA UNA CUBIERTA CON ANILLO DESPLEGABLE.

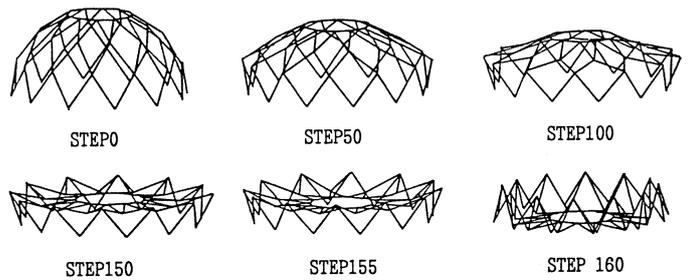
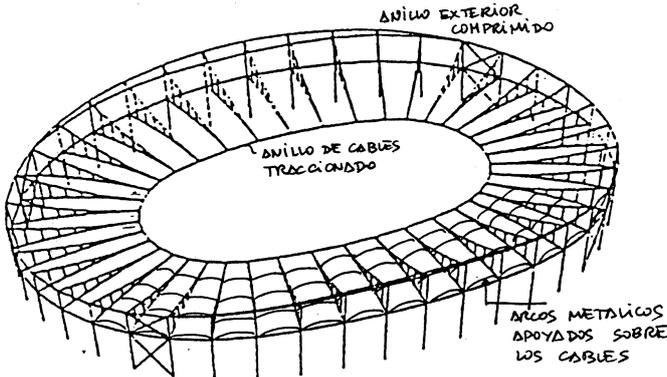


Fig. 20.—ESQUEMA DEL COLAPSO DE UN MECANISMO (K. KAWAGUCHI).

Fig. 18.—ESQUEMA DE LA CUBIERTA DEL NECKARSTADION DE STUTT-GART.

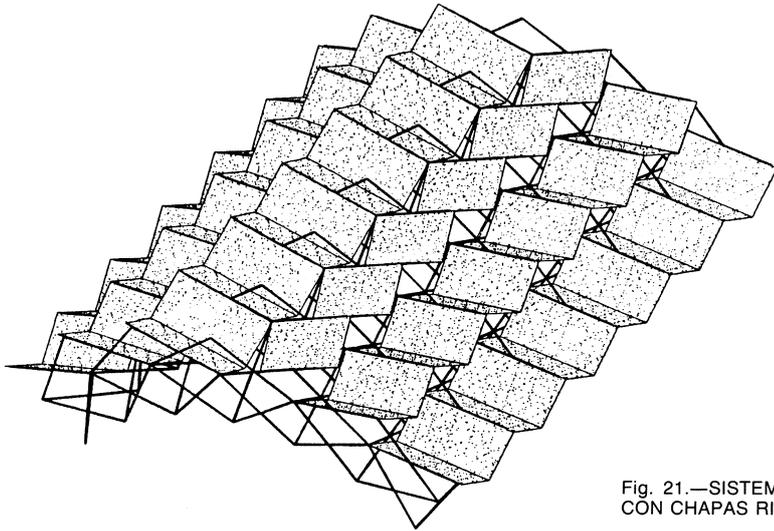


Fig. 21.—SISTEMA DE CUBRICION DE ESTRUCTURAS DESPLEGABLES CON CHAPAS RIGIDAS (VALCARCEL, ESCRIG, MARTIN).

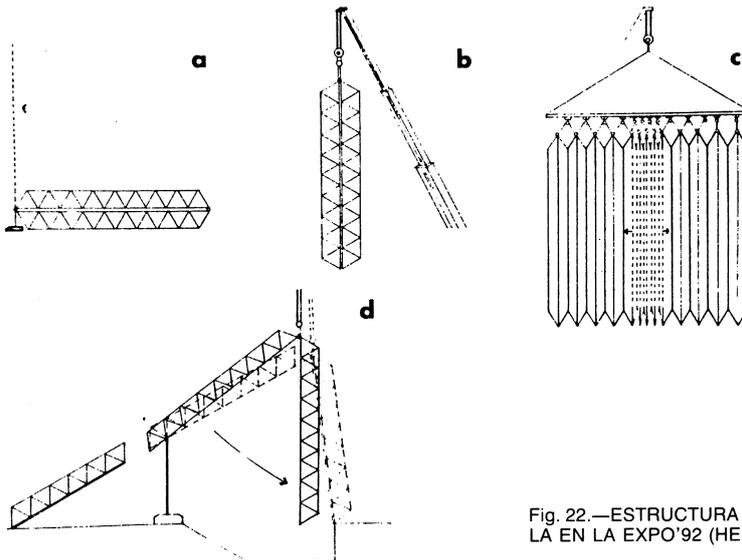
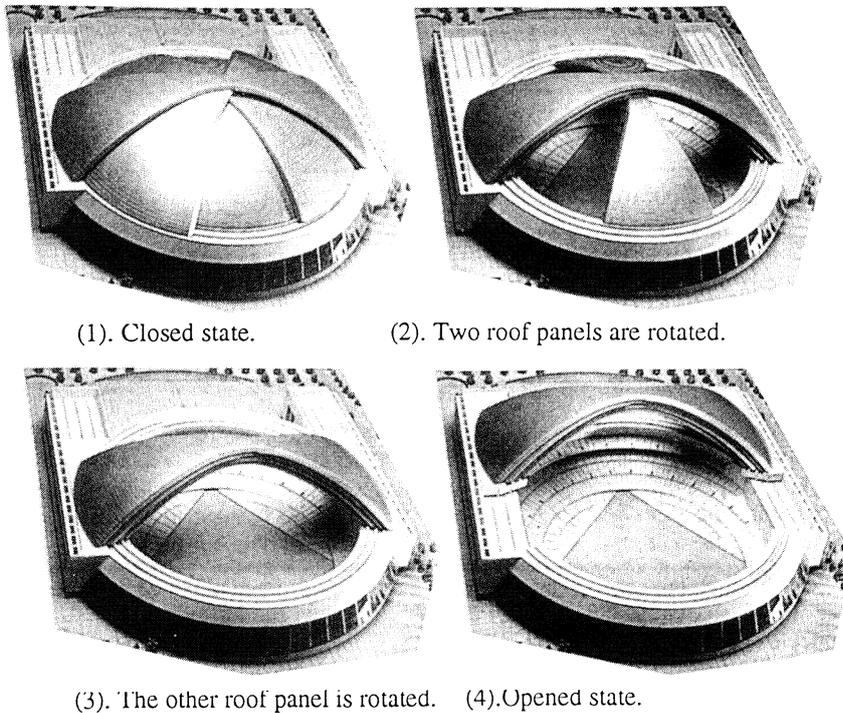


Fig. 22.—ESTRUCTURA DESPLEGABLE PARA EL PABELLON DE VENEZUELA EN LA EXPO'92 (HERNANDEZ MERCHAN).



(1). Closed state.

(2). Two roof panels are rotated.

(3). The other roof panel is rotated. (4). Opened state.

Fig. 23.—CUBIERTA MOVIL (MAKINO, KUROBANE, TAKAGI, HORI).

El estudio de divisiones geodésicas de la esfera sigue teniendo un fuerte desarrollo (Lalvani, Tarnai). Lo que resultó más curioso fue el estudio de Tarnai sobre formas geodésica y pelotas de golf.

También se presentaron otros tipos de mallas como las superficies minimales (Wester) o la presentada por Lobel sobre formas generadas por elementos idénticos, que permiten la triangulación de superficies, obviamente no regulares, por medio de triángulos iguales.

Por último, pueden citarse las propuestas de cuasicristales de Robbin que dio el toque de color al hall del Congreso con sus ingeniosas maquetas modulares (fig. 25).

ESTRUCTURAS DE VIDRIO

Uno de los temas que han provocado mayor interés estuvo en las estructuras que emplean el vidrio como cerramiento o cubierta resistente (Mollaert, Clinton).

Las realizaciones más avanzadas y de mayor interés fueron las presentadas por los especialistas de Mero, que parece haber iniciado una fuerte penetración comercial en este sector. Una de sus realizaciones más interesantes es la incluida en la figura 26.

OTROS SISTEMAS ESTRUCTURALES

En un Congreso tan nutrido de ponencias es normal que muchas de ellas no se adapten a unos apartados amplios y que por su escaso número sea conveniente agruparlas dentro de un apartado sin clasificar, como el presente.

Se esperaba algo más de este Congreso sobre estructuras de grandes luces. Fuera de las estructuras autotensadas, que ya hemos mencionado, únicamente puede destacarse la ponencia de Majowiecki sobre puentes de grandes luces, en la que se plantearon los problemas de posibles luces de cinco kilómetros.

En cuanto a las láminas, cada vez se tratan menos en estos congresos. Este no ha sido la excepción y se han presentado sólo algunas ponencias, sin avances significativos.

El tema de la optimización ha sido tratado en numerosas ponencias. Sin embargo estas estructuras que dependen de un alto número de parámetros siguen resistiéndose a los métodos de optimización al uso y no se ha visto nada que parezca suficientemente práctico para poder ser aplicado a problemas reales.

Aunque la presencia de ponencias sobre elementos arquitectónicos ha sido realmente abrumadora, se han presentado algunas ponencias ajenas a la arquitectura. Así podemos citar las torres de tendido eléctrico, las estructuras para intercambiadores de calor o las antenas para radiotelescopios. Incluso algunos elementos anecdóticos como el extraño elemento autodesplegable por acción térmica que presentó Neogi (fig. 27).

REALIZACIONES

En este tipo de congresos tan importantes como las aportaciones teóricas son las realizaciones concretas. Nos referimos a la exposición de un determinado edificio en sí, sin ser utilizado como ejemplo de determinada teoría, como sucede en los edificios que hemos referenciado hasta este momento. Son aportaciones generalmente muy interesantes, en las que pueden constarse soluciones concretas a los problemas que siempre plantean este tipo de estructuras. Fueron muy numerosas las realizaciones presentadas y sin ánimo de exhaustividad proponemos algunas de las que nos parecieron más interesantes (figuras 28, 29, 30).

CONCLUSIONES

El Congreso ha tenido un alto nivel y ha representado una excelente ocasión para reflexionar sobre los problemas de la arquitectura en una época de crisis y centrados en elementos tan concretos al tiempo que tan imaginativos como suelen ser las estructuras espaciales. De una manera resumida podemos constatar el avance destacado de las estructuras autotensadas, la consolidación de las estructuras de cables y membranas, el sostenimiento de las estructuras espaciales de doble capa y el fuerte impulso de las estructuras de vidrio. Las mallas de una capa parecen estar en retroceso y las propuestas de estructuras móviles y desplegables no acaban de imponerse a la crisis.

A nivel teórico junto con aportaciones de gran rigor y profundidad se empieza a reflexionar aunque sea minoritariamente sobre el camino desarrollado y si se está apuntando o no la dirección

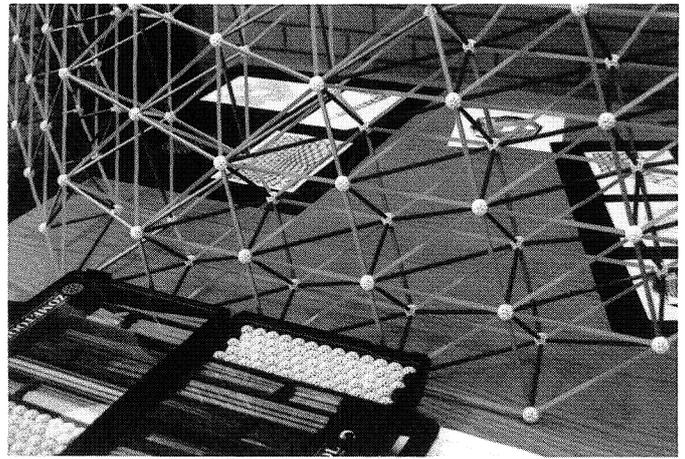


Fig. 25.—MAQUETA ELABORADA POR ROBBIN.

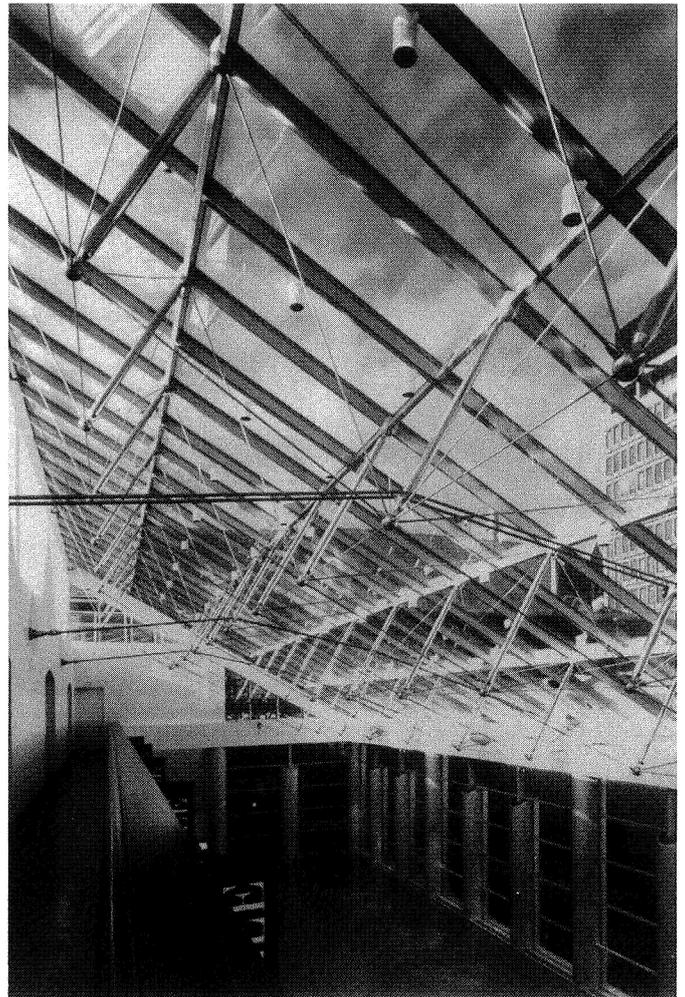


Fig. 26.—CUBIERTA DEL MUSEO DE MONTREAL. SISTEMA MERO.

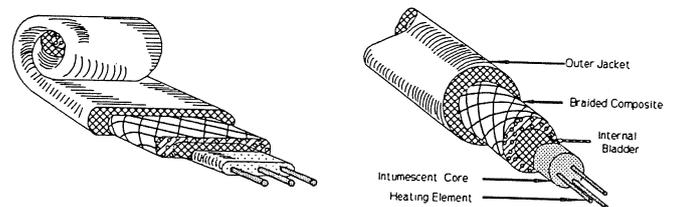


Fig. 27.—ELEMENTO AUTODESPLEGABLE TERMICAMENTE (NEOGI).

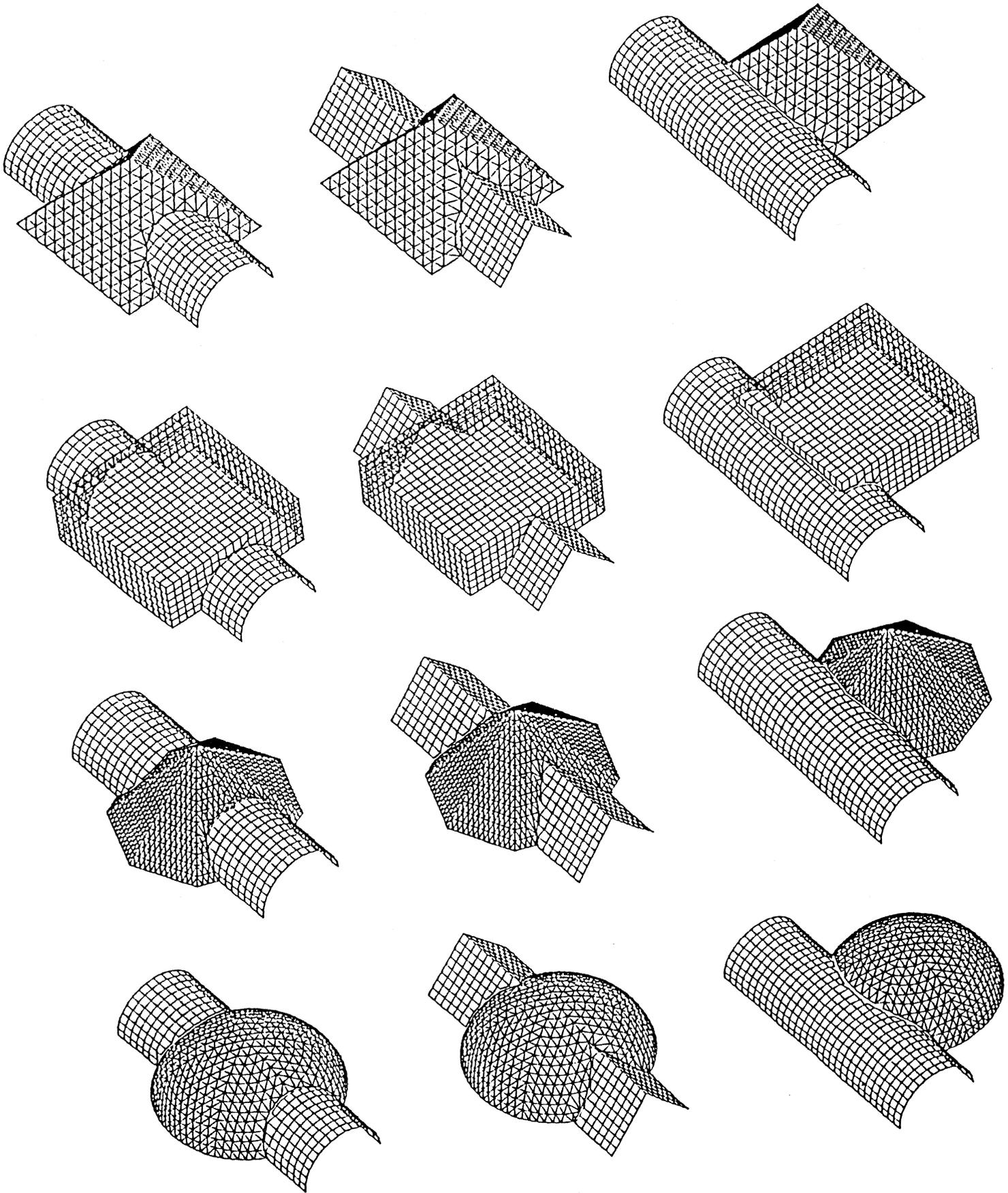


Fig. 24.—FORMAS COMPLEJAS GENERADAS CON ALGEBRA FORMEX.

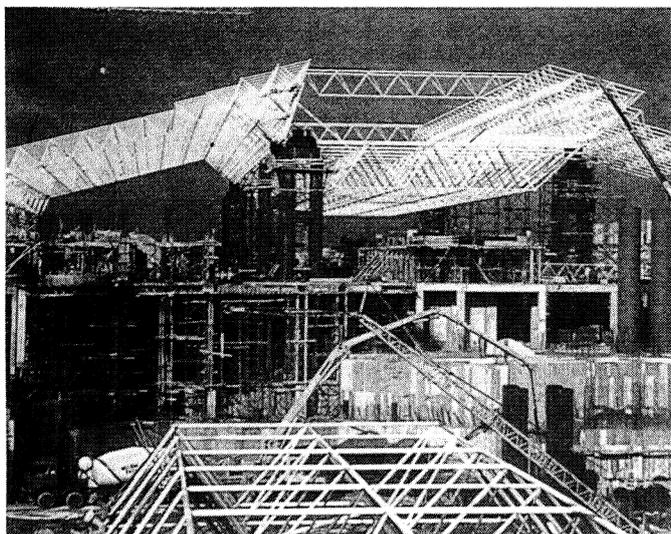


Fig. 29.—ESTADIO OLIMPICO DE NATACION DE ATENAS (KLIEM).



Fig. 28.—BENTALL CENTRE EN KINGSTON UPON THAMES (BAIRD, JAMES, SHOTTON).

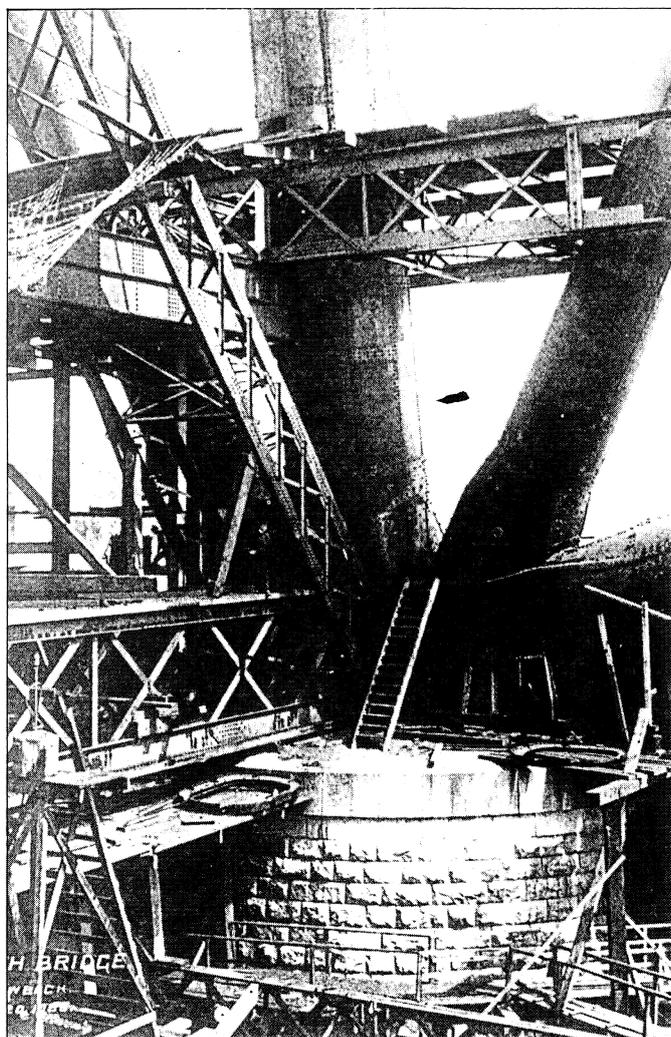


Fig. 31.—APOYO DEL PUENTE DEL FIRTH OF FORTH.

correcta. El ordenador está creando una cierta desconfianza, sobre todo por la no cualificación de alguno de sus usuarios, que urge tener en cuenta. También se está perdiendo a todos los niveles la confianza absoluta en que todo problema ha de pasar por el ordenador para ser fiable. El ordenador sólo sirve para que los que saben diseñar estructuras lo hagan más rápida y cómodamente, pero nunca para que el que no sabe delegue en él.

El que más destacó en el Congreso en esta línea ha sido Taylor, quien en una conferencia magistral ironizó sabiamente sobre la importancia del sentido común estructural utilizando ejemplos de las grandes realizaciones del pasado. Podemos concluir este resumen con una frase suya referente a un apoyo del famoso puente de Firth of Forth (fig. 31): «Hoy se calcularía por elementos finitos y pesaría más el papel que el apoyo». Que en estructuras tan complejas como las que comentamos es un buen punto para la reflexión.

REFERENCIAS

Las ponencias citadas se han publicado en los Proceedings del Fourth International Conference on Space Structures. Surrey, 1993. Thomas Theiford Services Ltd. Londres. Las referencias que se citan provienen íntegramente de esta publicación.

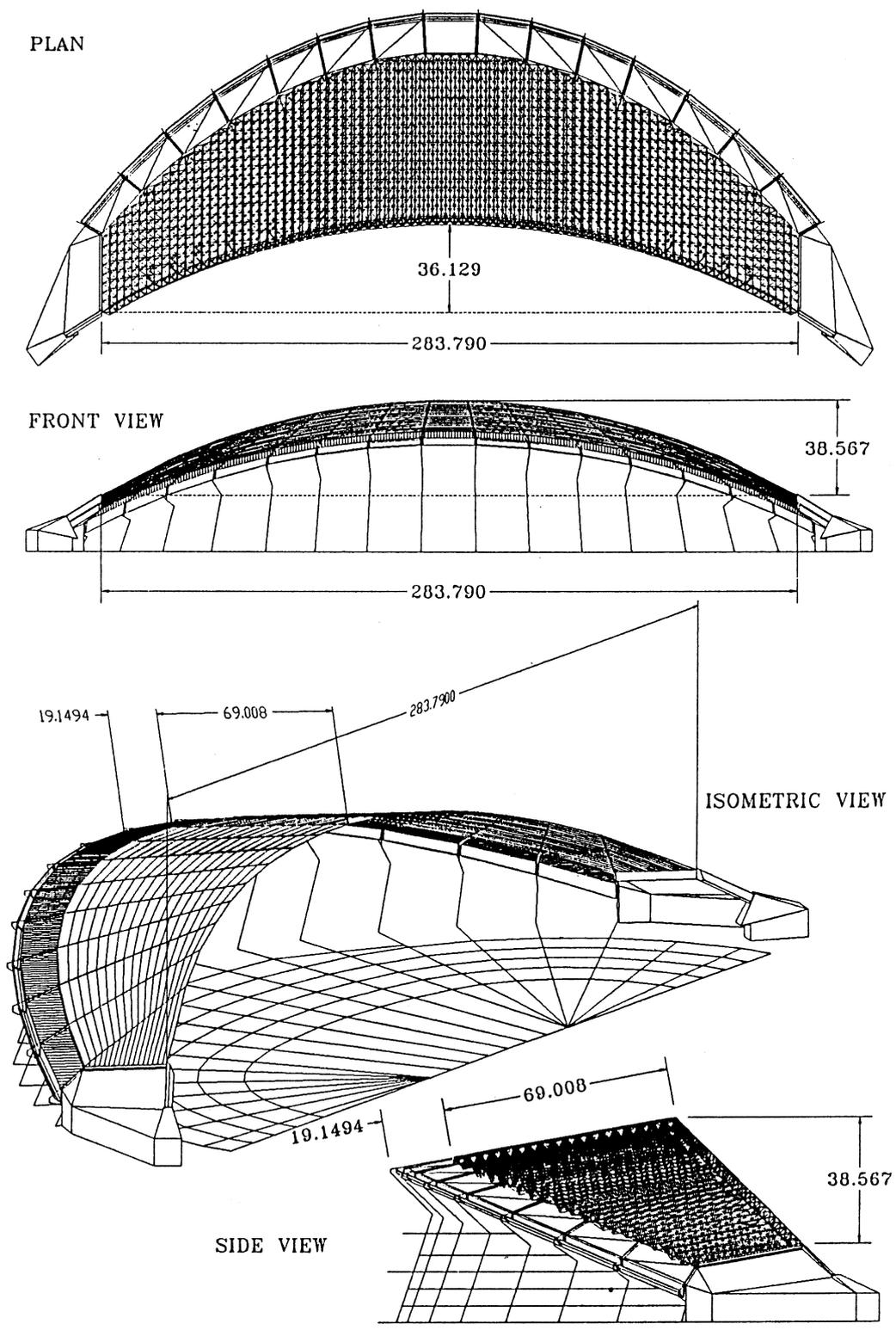


Fig. 30.—ESTADIO EN SELANGOR, MALASIA (HSIAO Y MAJIC).