

LAS MALLAS ESPACIALES Y SU APLICACION EN CUBIERTAS PARA ESTADIOS

Juan Martínez Apezteguia

Dr. Ingeniero Industrial

Director Técnico de ORONA, S. COOP.

División Estructuras

0. Introducción

Durante las últimas décadas el empleo de las estructuras espaciales en la construcción ha tenido un espectacular desarrollo. Entre las causas que lo han motivado cabría citar como fundamental el hecho de que están concebidas bajo la perspectiva de conseguir un alto grado de fabricación, aspecto que ha permitido importantes ahorros de mano de obra tanto en fabricación como en montaje. La complejidad del cálculo requerido para su dimensionamiento constituyó durante muchos años una importante limitación en sus aplicaciones. La generalización del empleo de los ordenadores ha permitido el análisis rápido y preciso de estas estructuras propiciando grandemente su competitividad.

Por sus singulares características las mallas espaciales son especialmente aptas para cubrir grandes espacios sin columnas intermedias. De aquí que se hayan aplicado con gran profusión como estructuras portantes en las cubiertas de recintos deportivos cerrados.

Las cubiertas para tribunas de estadios deportivos, si bien presentan características muy diferentes de las empleadas sobre recintos cerrados, por sus especiales condiciones de apoyo suelen imponer unos diseños estructurales sometidos a importantes solicitaciones. Esto invita a pensar en la utilización de las estructuras espaciales con este fin.

Con este documento se pretende en primer lugar exponer los aspectos técnicos más característicos de este tipo de estructuras, para juzgar posteriormente sobre la conveniencia de aplicación de las mismas a las cubiertas de estadios.

1. Descripción y características

Desde un punto de vista de clasificación estructural puede considerarse espacial toda estructura en la que la distribución de los elementos resistentes es tal que no permite un análisis de su comportamiento por planos independientes. En contraposición, las estructuras consideradas como planas serían aquéllas susceptibles de ser descompuestas en diferentes subconjuntos comprendidos, cada uno de ellos, en un plano dentro del cual pueden ser analizados separadamente de los demás. En esta clasificación quedan incluidas las formas estructurales un tanto singulares como cúpulas, bóvedas hiperboloides, etc., así como otras muchas soluciones constructivas, algunas incluso muy elementales.

Dentro de las estructuras espaciales, las que han sido objeto del gran desarrollo a que se ha hecho referencia en la introducción, son un determinado tipo de estructuras, que propiamente deberían ser consideradas como celosías tridimensionales y que con frecuencia se conocen por mallas estereas o espaciales. Estas estructuras se caracterizan por estar constituidas a base de elementos muy simples (barras y nudos) que ordinariamente se ensamblan en obra por atornillado para formar el conjunto estructural. La topología, distribución geométrica de barras en el espacio, se consigue como consecuencia de la repetición y yuxtaposición de poliedros sencillos correspondiéndose las barras con las aristas de aquéllos y los nudos con sus vértices. El conjunto, de gran repetibilidad geométrica, recuerda en cierto modo, y no por



casualidad, las organizaciones estructurales más elementales de la naturaleza como son las que forman los átomos para componer los cristales moleculares. En los casos más frecuentes el conjunto está comprendido entre dos superficies envolventes, sensiblemente paralelas, planas o no, que se denominan capas de la malla. Cada capa suele estar compuesta por una red de barras dispuestas en forma de retícula. Los nudos de cada capa se conectan con los de la opuesta mediante otras barras denominadas normalmente «diagonales».

Con el fin de presentar las peculiaridades de estas estructuras, a continuación se exponen los aspectos comparativos que, a nuestro juicio, mejor diferencian las mallas espaciales respecto de las estructuras metálicas convencionales.

Las primeras diferencias se deducen de la propia organización geométrica. Las estructuras convencionales para cubrir grandes luces ordinariamente se componen de subestructuras planas de diferentes órdenes (jácenas, cerchas, correas, etc.), cada una de las cuales recibe las cargas de otras de orden inmediato inferior para transmitir las, a su vez, a las de orden superior. En las mallas espaciales, por el contrario, no existen elementos preponderantes. Todas las barras forman parte de un conjunto entrelazándose de forma que los esfuerzos se reparten entre todas siguiendo preferentemente las direcciones principales de la retícula. En las aplicaciones más normales de estas estructuras, las superficies envolventes de la malla son dos planos paralelos que frecuentemente se disponen horizontalmente dando lugar a lo que se conoce por «cubiertas planas». Conviene aclarar que a pesar de esta denominación se trata de estructuras espaciales, que en absoluto se componen de subestructuras planas. El comportamiento conjunto es similar al de una placa en la cual las flexiones según dos direcciones ortogonales quedan canalizadas a través de las barras horizontales y los esfuerzos cortantes son soportados por las diagonales. Normalmente las conexiones entre las barras son tales que permiten ser consideradas como articulaciones puras; en consecuencia dichas barras, a menos que reciban acciones directas del exterior, quedan exclusivamente sometidas a esfuerzos axiales; de aquí su clasificación como celosías.

El trabajo conjunto de todos los elementos y el reparto de los esfuerzos, en varias direcciones principales, hace que los valores máximos de las sollicitaciones sean normalmente muy inferiores a los que se producirían en una estructura equivalente constituida por celosías planas. De aquí se deduce una de las aptitudes más significativas de

las mallas, que es su capacidad para cubrir mayores luces bajo los mismos niveles de esfuerzo. Teniendo en cuenta además que sus barras sólo trabajan a tracción o compresión y que ordinariamente se construyen con perfil tubular, óptimo para este tipo de sollicitaciones, se comprende fácilmente que estas estructuras tengan un peso propio muy inferior al de las convencionales. Es frecuente que para cubiertas ligeras con luces comprendidas entre 20 y 50 m el peso propio oscile entre 12 y 20 Kg/m².

Otra consecuencia de la favorable distribución de esfuerzos es la obtención de estructuras muy esbeltas, en el sentido de que el volumen ocupado es mínimo. Una característica interesante a considerar en cualquier estructura de cubierta es la relación entre el canto y la luz. Normalmente es conveniente obtener valores reducidos de este cociente. La disminución del mismo hace crecer inversamente las sollicitaciones y las deflexiones bajo carga, exigiendo finalmente dimensionamientos más costosos. A nivel práctico el citado cociente suele quedar limitado, y en el caso de las estructuras metálicas ordinarias para grandes luces no conviene adoptar valores inferiores a 1/15 aproximadamente. En las mallas espaciales el canto suele denominarse «espesor de malla», siendo la separación entre las capas opuestas. En aplicaciones a cubiertas planas apoyadas en todo el contorno puede llegarse razonablemente a relaciones espesor/luz del orden de 1/20 sin esfuerzos ni deflexiones excesivos.

Evidentemente el óptimo aprovechamiento de estas estructuras se consigue cuando las diferentes direcciones principales de la malla contribuyen equilibradamente a soportar las cargas exteriores. Esto se consigue en mayor grado en aquellas cubiertas en que la malla puede apoyarse en todo el contorno y cuando las dimensiones generales que definen la planta son parecidas. Es decir, en este sentido será más favorable una cubierta de planta cuadrada, que una rectangular de la misma luz pero con notable diferencia entre sus dimensiones principales. Análogamente una planta circular se comportaría mejor que otra elíptica de gran excentricidad. En definitiva, la competitividad de las mallas espaciales respecto de las estructuras planas depende no sólo de la luz o dimensión mínima entre alineaciones de soportes, sino también de las proporciones de la planta a cubrir. Por supuesto que si en una cubierta cuadrada la malla sólo puede soportarse en dos contornos opuestos, quedando los otros dos sin apoyos, una de las direcciones no contribuye al esfuerzo y el beneficio derivado del aprovechamiento de la forma se desaprovecha. En tal caso la malla queda trabajando como un conjunto simple de vigas paralelas.



Otra característica destacable es la rigidez del conjunto estructural que forman las mallas espaciales. La cubierta se comporta como un entramado sólido prácticamente indeformable que le confiere importantes ventajas. En primer lugar permite una distribución muy flexible de los apoyos o conexiones con la sustentación, requiriendo generalmente un menor número de columnas y permitiendo además una mayor versatilidad en cuanto a las posiciones de las mismas. Como ejemplo cabe citar la cubierta del Polideportivo Municipal de Burgos cuya planta supera los 4.000 m², sustentándose exclusivamente en cuatro puntos.

Pero, además, el hecho de que la propia cubierta se comporte como una placa uniendo las cabezas de las columnas sobre las que descansa, hace que todas ellas trabajen conjuntamente cuando la estructura queda sometida a acciones exteriores horizontales. Esto reporta un nuevo beneficio sobre el dimensionamiento de la sustentación respecto de las acciones de viento y esfuerzos sísmicos.

Un aspecto dependiente de la interrelación entre todos los elementos de la estructura es la necesidad de calcularla toda ella conjuntamente. En el caso de que la estructura tenga un comportamiento lineal, el modelo matemático que la representa implica el establecimiento de un sistema de ecuaciones lineales con un elevado número de incógnitas, tres por cada nudo de la estructura, que evidentemente sólo permite su tratamiento mediante ordenador. Ante la dificultad de abordar el cálculo por métodos directos, en una primera época se emplearon métodos aproximados basados generalmente en cálculo por analogías con placas equivalentes. Estos métodos permiten obtener una idea aproximada de los esfuerzos máximos en las barras horizontales de estructuras con formas bastante regulares, pero ocasionan importantes erro-

res en la determinación de los esfuerzos sobre las diagonales próximas a los contornos o en zonas irregulares. Por otra parte la determinación de las deformaciones es bastante dudosa al no incluir debidamente el efecto del esfuerzo cortante.

Hoy día no tiene sentido aplicar los métodos de asimilación salvo en aproximaciones y predimensionamientos. Para un dimensionado definitivo conviene recurrir al cálculo directo, que mediante programas adecuados puede ser ejecutado por la mayoría de los ordenadores de capacidad media.

Como se ha citado con anterioridad, una característica importante de las mallas espaciales es la capacidad para ser descompuestas en un gran número de elementos iguales o muy similares. Esto sugiere inmediatamente la prefabricación de los mismos que suelen ser simplemente barras y nudos. Mediante una adecuada estandarización estos elementos pueden ser fabricados de forma muy automatizada. Tanto los nudos como las barras son perfectamente apilables, tal como se encuentran a la salida de fábrica. Esto constituye una nueva ventaja porque, además de facilitar el almacenamiento, reduce sustancialmente los costes de transporte. Al citar la estandarización de los elementos conviene aclarar que en ningún modo implica la estandarización de las estructuras. Por el contrario, un sistema constructivo ingeniosamente diseñado puede permitir con pocos elementos diferentes la construcción de las más variadas realizaciones.

La automatización y sistematización de estas estructuras no se limita al proceso de fabricación de sus componentes sino que, en lo posible, se extiende al montaje. Con tal fin los elementos suelen conectarse en obra mediante atornillado por procedimientos muy repetitivos. El proceso que se utiliza habitualmente para el montaje de mallas espaciales es consecuencia de la rigidez estructural a que anteriormente se hacía referencia. Generalmente el ensamblaje de toda la cubierta se realiza a pie de obra. Posteriormente, mediante grúas, se eleva todo el conjunto o grandes fragmentos del mismo hasta colocarlos en su emplazamiento definitivo. Este proceso se caracteriza por su gran rapidez y proporciona una mayor seguridad de los operarios al reducirse al mínimo las operaciones en altura.

Una consecuencia más de la estandarización es la gran adaptabilidad que presentan las mallas espaciales atornilladas para cambios o ampliaciones futuras de las construcciones, e incluso para el traslado de toda una cubierta hasta otro lugar de emplazamiento.

Finalmente como aspecto destacable de estas estructuras cabe citar su depurada estética. La armonía geométrica de un lado y el empleo del perfil tubular por otro contribuyen a realizar una importante función ornamental que, frecuentemente, es buscada por el proyectista.

2. Topologías básicas y elección de parámetros

En la anterior descripción de las mallas espaciales se han considerado como más habituales las de doble capa, en las cuales los nudos se encuentran situados solamente en las dos superficies envolventes. Pueden generarse topologías que distribuyen sus nudos en diferente número de capas. Cabe citar las mallas de triple capa que han sido objeto de recientes investigaciones por parte del Prof. Makowski, con resultados interesantes acerca de su rigidez. Por ahora no han tenido gran difusión, ya que el gran número de elementos y conexiones que presentan hace poco rentable su empleo. También suelen proyectarse mallas de una sola capa. Estas sí que presentan un notable interés económico, pero su empleo queda bastante restringido. Bajo el supuesto de que las uniones se comportan como nudos articulados las mallas monocapa sólo son estables si se distribuyen en superficies de doble curvatura (cúpulas) mediante retículas triangulares. En cualquier caso no son económicamente aplicables a grandes luces por el riesgo que presentan de fenómenos de inestabilidad generalizada.

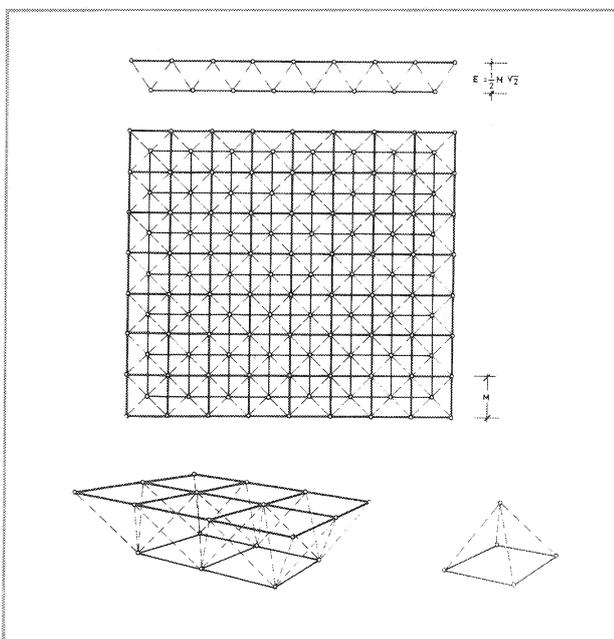


Fig. 1

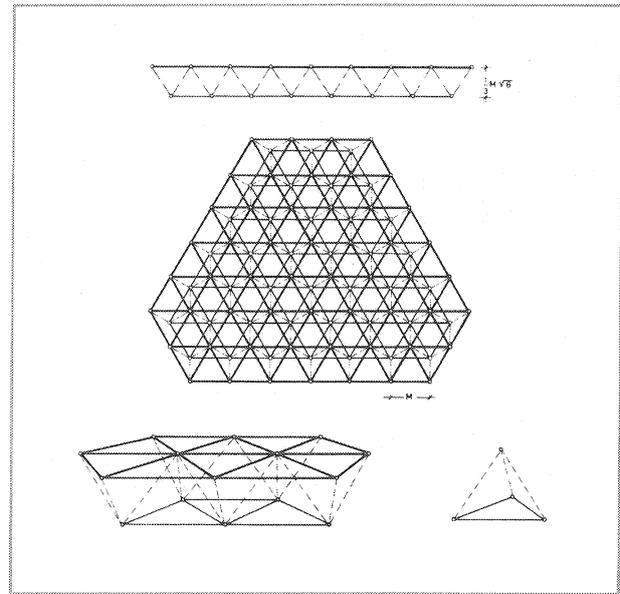


Fig. 2

En las aplicaciones usuales se emplean casi exclusivamente las mallas de doble capa. La limitada extensión de este documento nos impide una descripción detallada de todas las formas posibles de componer la geometría elemental de estas estructuras, no obstante se expondrán brevemente las topologías básicas más empleadas.

Como se había citado anteriormente, la distribución de barras en el espacio se obtiene por yuxtaposición de poliedros estables. Los únicos poliedros regulares estáticamente determinados son el tetraedro y el octaedro; ambos dan lugar a la generación de las dos mallas más elementales.

La malla octaédrica, sin duda la más empleada, está generada por la repetición de semioctaedros o pirámides de base cuadrada, unos con el vértice hacia arriba y otros invertidos. En cada capa se forma una retícula cuadrada quedando los nudos de una de ellas sobre los centros de cuadrados de la opuesta. En cada nudo concurren ocho barras, cuatro horizontales y cuatro diagonales (figura 1).

La malla tetraédrica se obtiene por yuxtaposición de tetraedros. La retícula de cada capa es triangular existiendo tres direcciones preferentes de canalización de los esfuerzos (Fig. 2). Estas mallas son más rígidas que las octaédricas y producen una mejor distribución de esfuerzos.

En general, para una misma aplicación, con la malla tetraédrica se consiguen esfuerzos notablemente inferiores a los que se producen con la octaédrica. También las flechas provocadas para

igualdad de capacidad resistente suelen ser menores. A pesar de esto las mallas tetraédricas son generalmente más caras porque, en el caso de aplicar la misma longitud elemental de barra, el número total de elementos requeridos para la construcción de la malla es notablemente superior. Como se expondrá más adelante, la densidad de nudos de una estructura es un factor decisivo en su economía. A título indicativo cabe citar que, por término medio, la malla tetraédrica puede resultar del orden de un 20 a 30% más cara que la octaédrica, pero esto no debe considerarse en absoluto como una regla, ya que en determinadas aplicaciones puede incluso resultar más económica. En particular, en los casos de estructuras con planta hexagonal o triangular este tipo de malla puede resultar más adecuado por su mejor adaptación al contorno.

Partiendo de las dos topologías citadas pueden deducirse otras mediante cambios en la orientación de alguna de las retículas, eliminación o adición de determinadas barras, etc. Algunas de estas derivaciones pueden incluso resultar más económicas en ciertas aplicaciones concretas, pero no se expondrán aquí por carecer de interés general.

Como en cualquier tipo de estructura, en las mallas espaciales concurren una serie de variables cuya incidencia sobre el coste puede ser importante. Algunas de ellas pueden quedar bastante impuestas por la funcionalidad del edificio a cubrir, como son la carga unitaria a soportar, la luz, etcétera. Sin embargo existen otras que, teniendo una repercusión trascendental sobre el coste, pueden ser elegidas con bastante libertad. Se ha citado ya la influencia que puede tener el tipo de malla. Mucha mayor trascendencia tienen los parámetros que la determinan, módulo y espesor.

Se entiende por módulo la longitud de cada una de las barras de la retícula, normalmente horizontales. El número de nudos y barras requerido por una estructura varía de forma inversamente proporcional al cuadrado del módulo. Análogamente a lo citado al comparar las dos topologías básicas, el incremento de la densidad de nudos repercute negativamente en el coste. Por ser el módulo la variable que mayor incidencia tiene en la densidad de nudos de la estructura, este parámetro resulta ser el de mayor repercusión económica. Valores inferiores a los 2 m son casi siempre antieconómicos y sólo cabe aplicarlos en condiciones especiales o en estructuras de reducidas dimensiones con carácter preferentemente ornamental. Cuando las dimensiones generales y las luces son importantes conviene acercarse a los 3 m de modulación. Por encima de estos valores la estructu-

ra puede resultar todavía más económica, pero normalmente no interesa demasiado su utilización desde una perspectiva global porque los sistemas habituales de cerramiento, a base de chapas, sandwich, etc., no permiten mayores separaciones entre apoyos. Módulos muy superiores obligarían a una estructura auxiliar para el apoyo del elemento de cierre y el coste total podría salir perjudicado.

En cuanto al espesor de la malla, también tiene una incidencia apreciable en el coste, ya que los esfuerzos originados en una determinada malla son inversamente proporcionales al valor de este parámetro. Con anterioridad se ha citado el orden de magnitud que adquiere el cociente espesor/luz para las utilidades comunes en cubiertas planas. En cuanto a su relación con el módulo, el espesor también debe estar comprendido entre ciertos límites. El cociente espesor/módulo normalmente suele estar comprendido entre 0,5 y 1. Relaciones inferiores provocan esfuerzos excesivos en las barras diagonales, mientras que las superiores tienden a aumentar la esbeltez de estas barras obligando a dimensionamientos excesivos por pandeo. En general, en estructuras de grandes luces con esfuerzos importantes conviene que el espesor se aproxime al valor del módulo, siempre que sea compatible con las posibles limitaciones que por otras razones puedan imponerse al volumen de la cubierta.

En la figura 3 puede apreciarse la influencia combinada del módulo y espesor sobre el coste. Estas tendencias serían aplicables a estructuras concretas, en el supuesto de que se mantengan constan-

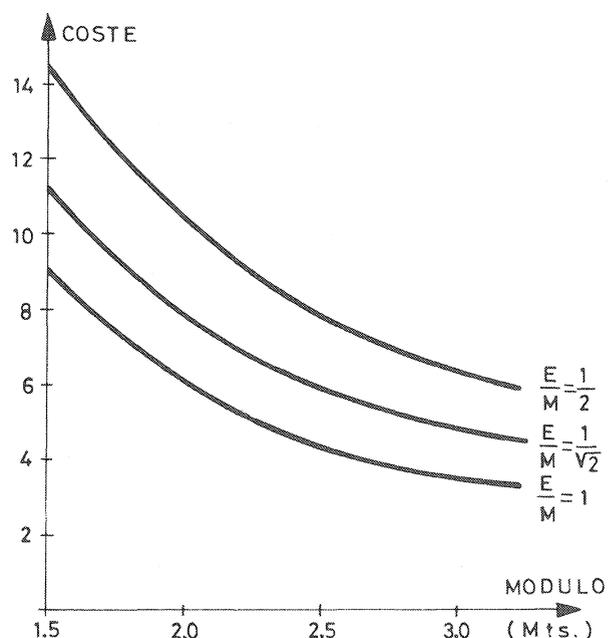


Fig. 3

tes las demás variables. También conviene aclarar que en lo que respecta al espesor este gráfico sólo es válido para los casos de grandes luces en cubiertas planas. En los casos de estructuras con reducidos esfuerzos la incidencia del espesor en el coste es mucho menos apreciable.

3. Sistemas constructivos

En las mallas espaciales ordinarias, las barras se conectan entre sí por medio de una pieza especial que constituye el núcleo del nudo. Las conexiones presentan unas características peculiares muy diferenciadas de las que se producen en las estructuras planas. El nudo debe permitir la concurrencia de un elevado número de barras, ocho o nueve frecuentemente, algunas de ellas bajo direcciones muy diversas en el espacio; pero además debe proporcionar el cumplimiento de unas condiciones técnicas aceptables dentro de un diseño económicamente viable.

Las propiedades deseables más interesantes que, a nuestro juicio, deben reunir los sistemas de conexión son:

- a. Capacidad para adaptarse a cualquier distribución geométrica de barras en el espacio.
- b. Sencillez de montaje e independencia en el orden de ensamblaje de los elementos, cualquiera que sea la topología.
- c. Fiabilidad de la estructura.
- d. Óptimo aprovechamiento de los materiales.
- e. Comportamiento acorde con la hipótesis de cálculo.
- f. Bajo coste de mantenimiento.

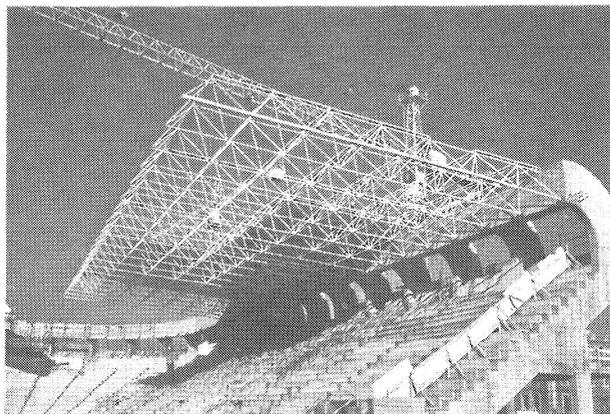
Existen muchos sistemas para la construcción de este tipo de estructuras, con diseños muy variados, pero no todos se aproximan suficientemente al cumplimiento de las propiedades indicadas. En una primera época se emplearon sistemas soldados en obra, pero han caído en desuso por tener graves inconvenientes. Por un lado la calidad de las soldaduras es dudosa y sólo mediante costosas inspecciones radiográficas puede conseguirse una garantía suficiente. Por otro lado el proceso de montaje resulta excesivamente prolongado y costoso, no quedando compensado por el inferior coste de los componentes que salen de fábrica.

La propiedad citada de un comportamiento acorde con las hipótesis de cálculo, para los programas normales de análisis de mallas, implica que la unión debe asemejarse a una rótula pura. Esto

supone una rigidez cónica baja combinada con una rigidez axil elevada. En general los sistemas atornillados se aproximan bastante a la reducida rigidez cónica, pero no todos aportan una rigidez axil suficiente. La conexión atornillada presenta siempre una cierta discontinuidad con mayor o menor flexibilidad localizada y generalmente con un comportamiento no lineal. Si la rigidez axil es muy baja, la distribución de esfuerzos obtenidos por el cálculo puede discrepar notablemente de la que realmente se producirá en la estructura, pero además las deflexiones reales originadas bajo las cargas de trabajo pueden ser muy superiores a las determinadas en el cálculo. Cualquier sistema de conexión debe ser cuidadosamente ensayado tanto a nivel de nudos como de pequeñas estructuras con el fin de conocer su comportamiento real. Pueden considerarse satisfactorios los sistemas que por término medio producen deflexiones globales no superiores en un 10% a las determinadas por cálculo bajo la hipótesis de articulaciones puras.

No es objeto de este trabajo la descripción de los distintos sistemas que se encuentran en el mercado, no obstante cabe citar aquí el sistema MERO diseñado por el Dr. Mengerlinghausen, que fue uno de los precursores del empleo de las mallas espaciales. A pesar de que sus primeras ejecuciones datan de hace cuarenta años, este sistema presenta todavía una completa actualidad siendo, sin duda, el más difundido hasta el momento. Básicamente está constituido por nudos esféricos y barras tubulares que se atornillan axialmente sobre los nudos por medio de un ingenioso dispositivo de conexión. Con esta disposición consigue un razonable equilibrio entre las propiedades citadas anteriormente.

Todo sistema de conexión debe ser capaz de soportar los diferentes órdenes de esfuerzos que pueden darse dentro de la gama de estructuras en que desee aplicarse. Resulta conveniente estandarizar los componentes que lo integran dentro de diversos niveles de sollicitación con un escalonamiento tal que no provoque un excesivo desaprovechamiento de los materiales. La capacidad máxima de los elementos estandarizados suele oscilar de unos a otros sistemas entre 50 y 100 t. En la mayoría de ellos las barras normalmente se fabrican con perfil tubular y con acero de calidades comprendidas entre A-37 y A-52. Sus diámetros suelen oscilar entre unos 40 y 150 mm y los espesores entre unos 2 y 8 mm. Evidentemente pueden conseguirse elementos más resistentes con dimensionamientos superiores para las aplicaciones que se salgan de la gama estandarizada.



Los nudos suelen presentar muy variados diseños según los diferentes sistemas de conexión, pero en cualquier caso deben estar capacitados para recibir las tracciones y compresiones de las barras concurrentes. Cada diseño exigirá unas dimensiones mínimas dependientes del nivel de esfuerzos para el que está capacitado. Es conveniente que el tamaño del nudo sea reducido con el fin de evitar posibles fenómenos de inestabilidad por generación de rótulas plásticas. Las formas compactas son en este sentido las más convenientes.

También en el tamaño de los tornillos deben buscarse los mínimos compatibles con la resistencia precisa, de modo que se eviten posibles interferencias de barras en las proximidades del nudo. Esto lleva frecuentemente al empleo de tornillos de alta resistencia. En general, en el extremo de cada barra se sitúa una pieza que transmite el esfuerzo del tubo al tornillo. La conexión de dicha pieza al tubo se realiza por soldadura en taller y su proceso debe ser cuidadosamente controlado bien sea mediante ensayos no destructivos o por métodos destructivos aplicados por muestreo.

Las dimensiones de los elementos, tal como salen de fábrica, suelen ser relativamente reducidas, no muy superiores a 3 m de longitud. Esto facilita la

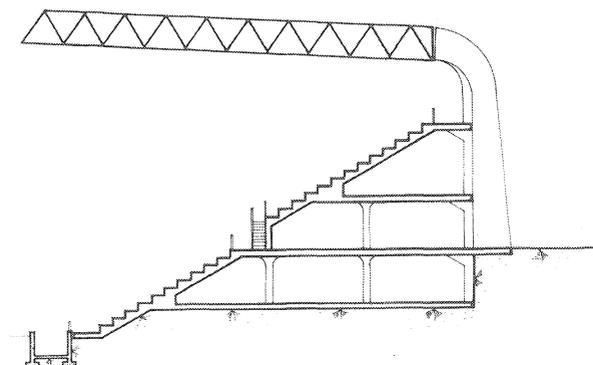


Fig. 4

aplicación de protecciones anticorrosivas mucho más eficaces que las empleadas sobre las estructuras convencionales por aplicación de pinturas en obra. Entre las diferentes formas de suministro habituales de las mallas espaciales cabe citar como más eficaces la galvanización en caliente y el pintado mediante resinas polimerizadas en horno.

Si bien pueden existir diferencias muy notables de coste entre unos y otros sistemas dependiendo del diseño concreto de cada uno, en cualquier caso el nudo, entendiendo por tal el conjunto de elementos que materializan la unión, es normalmente la parte más cara de estas estructuras. Las piezas que lo componen serán más o menos complicadas, pero siempre aportan un valor añadido muy superior al de los tubos. De aquí se deduce inmediatamente el interés de reducir en lo posible el número de nudos requeridos para formar una estructura.

Con el fin de cifrar lo expuesto en el párrafo anterior cabría hacer un desglose de los componentes del coste en estas estructuras. Esta descomposición puede oscilar mucho de unos a otros sistemas e, incluso, de unas a otras aplicaciones con con el mismo sistema; no obstante, con carácter orientativo, nos permitiremos presentar unos valores medios que aproximadamente serían:

Tubo: 25 - 35% (supone el 90% del peso total).
Nudos (componentes y fabricación): 35 - 45%.
Protección y pintura: 10 - 15%.
Montaje: 15 - 20%.

4. Tipologías para cubiertas de estadios

Las cubiertas para tribunas de estadios deportivos están sujetas a ciertos condicionamientos particulares que merecen ser destacados porque tienen una repercusión directa sobre las formas estructurales capacitadas para soportarlas. En primer lugar, el contorno próximo al terreno de juego debe estar libre de columnas que pudieran impedir la correcta visión del espectáculo por parte del público. Esto obliga a la aplicación de estructuras con grandes voladizos, frecuentemente entre 20 y 30 metros.

En segundo lugar estas estructuras suelen ser de tipo ligero. Las cargas exteriores se limitan a la acción de nieve y viento, ya que se trata de cubiertas no transitables, y el peso del cerramiento suele ser mínimo, correspondiendo al de una simple chapa o lámina traslúcida. Por otra parte, al

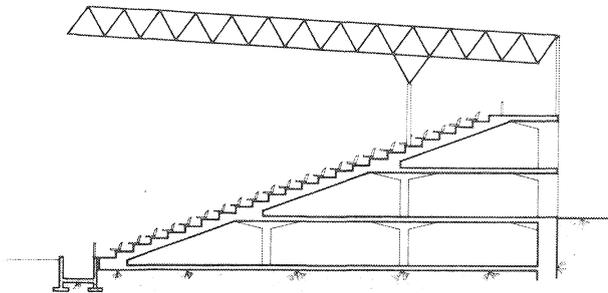


Fig. 5

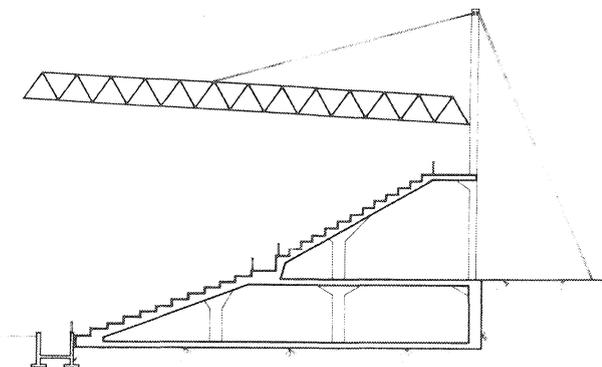
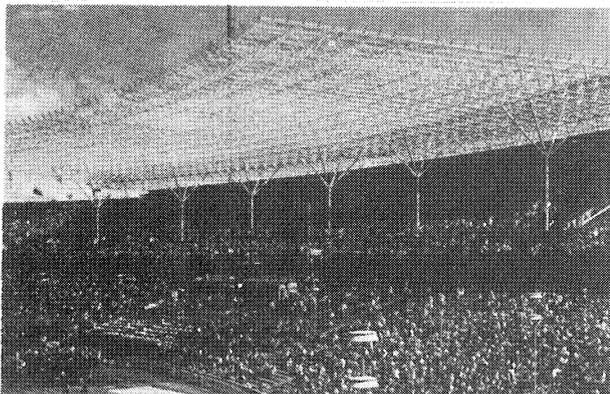


Fig. 6

tratarse de construcciones abiertas pueden quedar sometidas a fuertes presiones de viento en sentido tendente a levantar la cubierta. Dado que la carga permanente es reducida, en muchos casos las hipótesis de carga invertida superan en sollicitaciones a las de carga directa. Casi todos los elementos sufren inversiones de esfuerzos. Las estructuras metálicas convencionales a base de vigas, bien sean de alma llena o de celosía, en situación de carga directa, tienen comprimido su cordón inferior. En inversión de esfuerzos el cordón comprimido sería el superior. Para evitar posibles fenómenos de inestabilidad lateral se requiere en general una disposición de barras de arriostramiento en ambos cordones, sobre todo en el inferior, que complica estas estructuras y las encare-



ce. Por el contrario, en las mallas espaciales ambas capas quedan perfectamente arriostradas por la propia constitución de la estructura sin requerir elementos adicionales.

Otro aspecto que favorece el empleo de estructuras espaciales en estas aplicaciones es la simplicidad y rapidez de montaje. Las estructuras convencionales requieren un determinado orden de montaje de sus elementos, empezando por los más resistentes, celosías o vigas largas a veces poco rígidas, que deberían colocarse completos, a veces teniendo incluso que recurrir a apeos provisionales. Todo ello se complica por las peculiares características de los graderíos y el importante desnivel entre la cubierta y los mismos.

Dependiendo de las posibilidades de acceso de grúas y de sus capacidades, las mallas pueden ser fragmentadas por donde convenga. Cada fragmento se ensambla a pie de obra y tiene por sí solo la rigidez suficiente para ser izado y colocado en su emplazamiento. Por otra parte las barras perpendiculares a las de la dirección principal, que en el trabajo ordinario de la estructura quedarían sin sollicitación (normalmente las paralelas al campo), pueden durante el montaje realizar un trabajo preponderante permitiendo muy diversas posibilidades en cuanto al orden de composición de la estructura total. Todo ello da una gran flexibilidad al proceso de montaje, y en los casos de mallas atornilladas permite el desarrollo del mismo con gran rapidez. Como ejemplo cabe citar la estructura de la nueva cubierta del Estadio de Balaidos, en Vigo. Su superficie en planta es de unos 6.000 metros cuadrados y fue montada por un equipo de sólo cinco hombres en treinta y dos días laborales.

La solución más simple de aplicación de mallas espaciales a estas cubiertas consiste, como es lógico, en hacerlas trabajar preferentemente en la dirección perpendicular al campo, a modo de simple viga en voladizo. Las disposiciones concretas podrán ser diversas. En la figura 4 se muestra una de ellas en la cual la malla se empotra directamente en la sustentación. Esta disposición ha sido empleada en las tribunas recientemente remodeladas del campo de fútbol de San Mamés, en Bilbao.

Con esta disposición puede llegarse hasta vuelos del orden de los 25 a 30 m. Por encima de estos valores los esfuerzos se incrementan excesivamente encareciendo la estructura fuera de los márgenes razonables. No obstante cabe citar, como datos orientativos, que estructuras para cubiertas con voladizos del orden de los 25 m realizadas

con malla espacial presentan un peso propio de 15 a 20 kg/m², lo que demuestra la extraordinaria ligereza de estos sistemas.

Conviene tener presente que, a igualdad de niveles de esfuerzo, la luz equivalente de una estructura biapoyada será el doble de la del voladizo. La relación entre espesor y luz, que para estructuras apoyadas en todo el contorno se cifraba en el orden de 1/20, en estas disposiciones no debe ser inferior a 1/13 ó 1/14 con el fin de no generar excesiva flecha en el extremo. En cualquier caso estas relaciones son bastante favorables respecto de las que cabe obtener con otros sistemas estructurales. Por otro lado las mallas espaciales se prestan muy bien a la creación de contraflechas, con objeto de que la malla quede perfectamente plana bajo la acción de las cargas permanentes. Para ello basta con diferenciar muy ligeramente las dimensiones de las barras, acortando en origen las traccionadas y alargando las comprimidas. En la aplicación a voladizos se acortarían las superiores de la dirección perpendicular al contorno empotrado, y se alargarían las inferiores.

Cuando se requiere cubrir mayores secciones de graderío que las que permite el voladizo simple puede recurrirse a otras disposiciones que faciliten algún punto de sustentación más próximo al

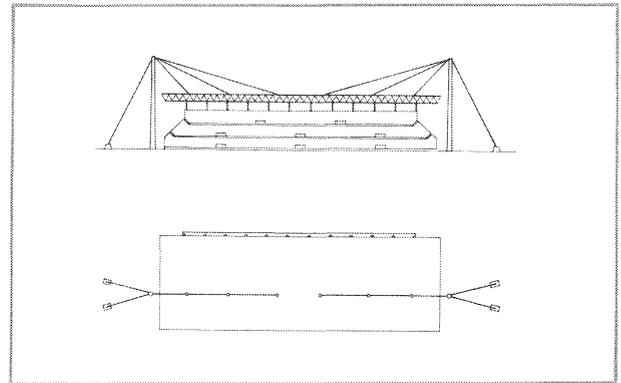


Fig. 7

borde libre de la estructura. En la figura 5 se muestra una solución a base de dos apoyos en cada pódico, quedando los delanteros comprimidos y los traseros traccionados. La figura 6 muestra una disposición que proporciona a la malla un punto de apoyo delantero mediante un tirante exterior. La primera de estas soluciones supone la existencia de columnas dentro del campo visual de algunos espectadores, pero este inconveniente puede quedar compensado por su mayor economía.

Como se recordará, una de las propiedades interesantes que presentan las mallas espaciales es la de permitir una notable reducción del número de apoyos, propiciando además una distribución de los mismos mucho más flexible. Aplicando debidamente esta propiedad a la disposición de apoyo delantero, mediante columnas, se puede minimizar el inconveniente citado llegando a soluciones muy satisfactorias. Un caso muy representativo de esta disposición es el de las cubiertas del Estadio de Berlín. Cada cubierta tiene una longitud aproximada de 150 m y anchura de 57 m, y se sustenta únicamente en 6 apoyos delanteros equidistantes unos 25 m entre sí. La malla espacial constituyente de esta cubierta tiene una topología muy bien seleccionada. Con el fin de adaptarse a una planta en forma de sector de anillo circular y tratando de reducir en lo posible el número de nudos diferentes, presenta una malla octaédrica distorsionada de forma que las barras horizontales se disponen radial y circunferencialmente. Para poder mantener constantes los ángulos de incidencia sobre los nudos, las pirámides de generación de la topología son todas semejantes y tienen un tamaño proporcional al radio en que se encuentran situadas. En consecuencia, no sólo las barras circunferenciales, sino también las radiales y el espesor se van reduciendo a medida que se aproximan al centro de curvatura. Como consecuencia, las capas exteriores de la malla no son paralelas.

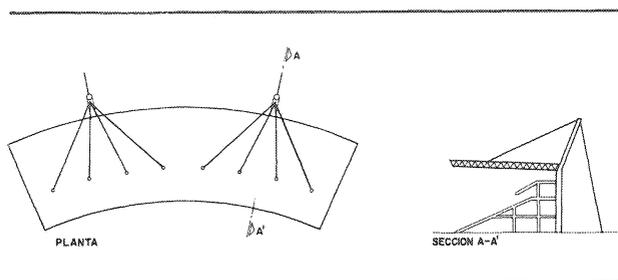


Fig. 8

En las disposiciones constructivas precedentes el trabajo estructural se orienta fundamentalmente en una sola dirección, lo que en cierto modo implica el mal aprovechamiento de una de las ventajas que ofrecen las estructuras espaciales. Cabría preguntarse si en tal caso tiene sentido la utilización de las mallas para estas aplicaciones. Los aspectos citados anteriormente, ligereza, estructura rígida muy arriostrada, flexibilidad de montaje, libertad en la disposición de los apoyos, etc., son suficientes para justificarlo incluso desde una perspectiva puramente económica. El ejemplo del Estadio de Berlín aporta alguna mejora en el sentido de que por lo menos, en la zona próxima a los apoyos, se ha aprovechado el trabajo de las barras circunferenciales precisamente para conseguir la separación de los mismos.

Cuando se pretenden obtener grandes voladizos, evitando totalmente las columnas intermedias, es preciso buscar otro tipo de soluciones que permi-

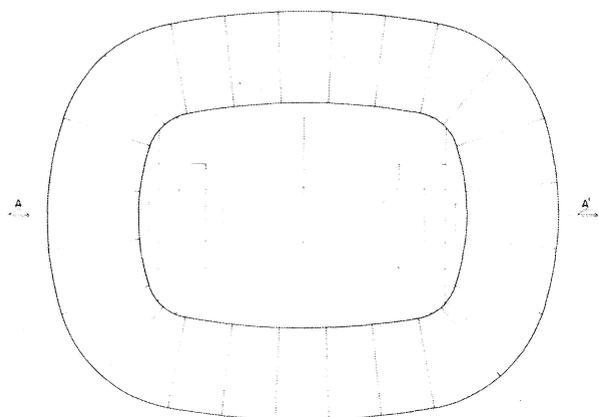


Fig. 9

tan una mejor utilización de las mallas. En particular, una buena orientación en este sentido constituyen aquellas tipologías encaminadas a combinar el trabajo en sentido longitudinal (paralelo al borde del terreno) con el transversal que es el que ordinariamente trabaja en voladizos puros. Una solución precursora de este trabajo, si bien no fue ejecutada mediante malla espacial por su anterioridad al empleo de estas estructuras, es la que se adoptó para la sustentación de la cubierta principal del Estadio de San Mamés. Un gran arco de 118 metros de luz dispuesto paralelamente al campo y apoyado fuera de los bordes laterales de la tribuna sustenta la cubierta que cuelga de aquél mediante pendolones.

Cualquier tipología aplicable a la construcción de grandes cubiertas, mediante sistemas estructurales más convencionales, puede ser desarrollada mediante mallas espaciales y probablemente con grandes ventajas por las peculiares propiedades de estas estructuras. Formas estructurales tales como bóvedas y cúpulas son perfectamente desarrollables con mallas espaciales. La consecución de una curvatura simple se puede lograr por distorsión de una malla octaédrica sin más que modificar las barras de una de las direcciones de la malla. Así, para la obtención de una bóveda basta alargar las barras de una de las direcciones de la capa superior o acortar las de la misma dirección en la inferior. La aplicación de una distorsión similar en las dos direcciones principales daría lugar a la generación de un casquete esférico, si bien existen otras topologías diversas para la consecución de cúpulas. Con estas disposiciones las mallas permiten abordar razonablemente luces muy superiores a las de las cubiertas planas. El comportamiento conjunto ya no es el de una simple placa plana que flexiona en dos direcciones, sino que se asimila más al de una cáscara con sus correspondientes componentes de sollicitación axial dentro de la superficie generatriz de la misma. Con estas disposiciones constructivas el cociente entre espesor y luz libre adquiere unos valores mucho más reducidos que los expuestos para las cubiertas planas, pudiendo llegarse a valores de 1/50 e incluso inferiores.

Un caso muy singular y probablemente el más significativo de la capacidad de empleo de las mallas espaciales es el de las cubiertas sobre las tribunas del Estadio de Split, en Yugoslavia. Estas cubiertas han sido diseñadas bajo la perspectiva de hacer trabajar a la malla en dirección paralela al terreno de juego. Se trata de sendos fragmentos de bóvedas con generatriz inclinada y seccionados por unos planos inclinados que dan lugar a contornos elípticos. Cada cubierta en planta pre-

senta una forma similar a un gajo de naranja. En su punto de máxima anchura el vuelo es de 45 m, lo que hubiese sido excesivo para un trabajo en voladizo simple. La solución adoptada ha consistido en apoyar la maya en todo su contorno exterior haciéndola trabajar en forma de bóveda con una separación creciente que en sus extremos llega a 215 m. Siendo el espesor de la malla de 2,30, la fracción espesor/luz resulta ser 1/90. Esta estructura ha sido construida mediante el sistema MERO y contiene del orden de 3.500 nudos y unas 13.000 barras distribuidas en una malla octaédrica de 3 m de módulo. El peso propio de la estructura es de 40 kg/m². La ejecución de una cáscara de estas dimensiones mediante sistemas constructivos tradicionales hubiera sido muchísimo más pesada, requiriendo un montaje más lento y costoso.

En la misma línea de pretender encauzar los esfuerzos según la dirección longitudinal de las cubiertas pueden proyectarse diversas tipologías, algunas de las cuales se citan a continuación a título de ejemplo.

Cada vez se emplean en mayor proporción las estructuras suspendidas por cables para la consecución de grandes vanos sin apoyos.

Bajo esta idea cabría sustentar toda la parte delantera de las cubiertas de estadios mediante tirantes. En las figuras 7 y 8 se presentan dos soluciones de este tipo. La primera de ellas sería aplicable a los casos en los que tanto los mástiles como los anclajes opuestos de los tirantes puedan situarse por los costados de la cubierta, mientras que la segunda se emplearía con estos elementos situados detrás del graderío. No obstante, en las soluciones a base de estructura atirantada hay que tener presente el problema suscitado por una posible inversión de esfuerzos que tendería a levantar la cubierta. En los casos en que esto sea posible cabe recurrir al diseño de alerones o deflectores del viento que lo impidan.

Otra gama de posibilidades se plantea ante la realización de cubiertas tales que deban cerrar todo el contorno exterior del estadio. En el supuesto de que dicho contorno tenga una forma sensiblemente circular, estos casos se prestarían a la realización de grandes cúpulas incompletas a falta de un círculo central que dejaría sin cubrir el terreno de juego. En tal caso las barras circunferenciales trabajarían como anillos comprimidos colaborando con las radiales. Tal vez esta situación pueda considerarse un tanto ficticia, porque normalmente los contornos exteriores de los estadios no son circulares y tampoco interesa que el espacio no

cubierto tenga forma circular. Sin embargo derivándose de esta disposición caben soluciones adaptables a las formas concretas de los estadios deportivos. En la figura 9 se representa una posible derivación de la idea anterior. La cubierta se ha dividido en una serie de sectores cada uno de los cuales es una especie de bóveda distorsionada, cuya superficie constituiría un sector cónico. Las generatrices de las bóvedas tienen una inclinación ascendente para que, cuando por acción de las cargas el borde de la cubierta tienda a descender, entren en acción los elementos estructurales paralelos al contorno interior, comportándose como anillos comprimidos. De este modo se garantizarían unos empujes horizontales entre las bóvedas contiguas de modo que pueden trabajar en la dirección de sus arcos.

Indudablemente las cubiertas para estadios se prestan a la aplicación de muy diversas tipologías que pueden ir desde las formas estructurales más simples hasta las de más sofisticada fantasía. Las interesantes propiedades que presentan las mallas espaciales, reiteradas a lo largo del presente artículo, hacen de estas estructuras una herramienta extraordinariamente capaz para materializar las diferentes soluciones estructurales proyectadas. Una utilización racional de las mismas, en combinación con los restantes elementos estructurales del proyecto, puede reportar importantes beneficios tanto económicos como funcionales. Aspectos tales como la selección del tipo de malla a emplear, determinación de los parámetros más convenientes, localización de los puntos de apoyo, etc. deben ser objeto de un detallado estudio y fruto de colaboración entre el director del proyecto y el especialista en el tratamiento de las mallas espaciales.

* * *