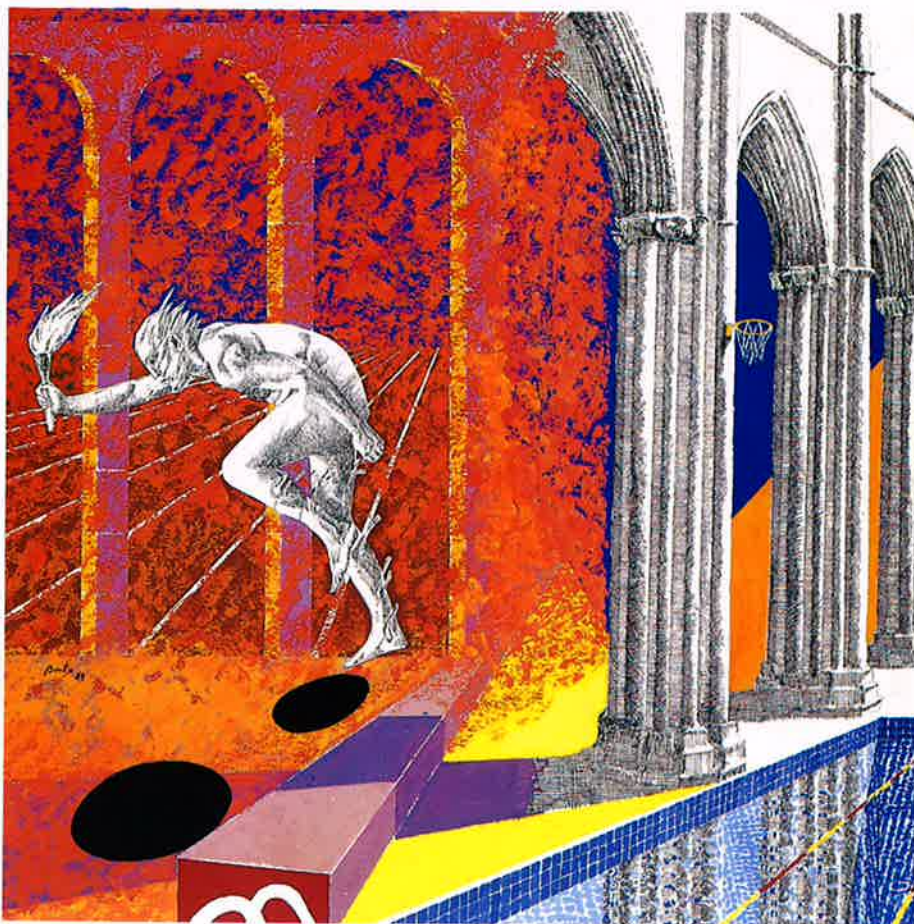


Curso de ARQUITECTURA DEPORTIVA

*Olimpio Alonso Fernández
José Luis Alvarez Vasallo
Eduardo Beotas Lalaguna
Jaime Cervera Bravo*

*Conrado Duránte Corral
Waldo Esteban Azpeitia
Luis Rodríguez-Avial Llardent*



Capítulo 3

Las estructuras en las áreas deportivas

JAIME CERVERA BRAVO

INTRODUCCION

No existe especificidad estructural alguna que pueda derivarse del uso deportivo: las estructuras aquí sirven, como en otros usos, para asegurar funciones espaciales básicas: mantener o cubrir superficies utilizables. Y para ello, los parámetros de comportamiento específicamente estructurales (estabilidad, resistencia, rigidez...) o los parámetros geométricos que aseguran dicho comportamiento (forma, luz, esbelteces...) no difieren de los que caracterizan a estructuras de otros espacios. Los problemas estructurales a resolver, los materiales o tipos estructurales que pueden ser utilizados, los métodos, o Normativa a utilizar no difieren en absoluto de los indicados en otros usos. ¿Por qué, entonces, un apartado estructural en este curso?

De hecho los espacios que se precisan se caracterizan por una cierta importancia en sus dimensiones libres (o muy alta importancia en casos muy singulares), y por la relevancia que reviste finalmente la estructura (cubiertas, marquesinas, tribunas...) en la percepción del espacio arquitectónico. Ello hace que la estructura constituya un elemento central en la definición de este espacio, planteando así una severa exigencia en su concepción y definición: no es concebible lograr un espacio de calidad sin una cuidadosa reflexión sobre la forma espacial (que depende en elevada medida de la forma estructural) y sobre las relaciones que se establecen entre la estructura portante y el resto de los elementos de definición del espacio (materiales de cerramiento, fuentes de iluminación...). El objetivo de estas líneas no es otro que el aportar herramientas para dicha reflexión.

CUBIERTAS Y ESTRUCTURAS DE GRANDES LUCES

La definición de una cubierta con importantes dimensiones libres es siempre un problema complejo: el campo de alternativas capaz de resolver los requisitos externos es muy amplio, y cada una de las soluciones posibles supone implicaciones muy diferentes.

Los requisitos arquitectónicos no son muchos, pero son de mucha «potencia»: son requisitos que invalidan radicalmente muchas posibles opciones, si bien su cumplimiento no se halla ligado a formas precisas. Aunque son evidentes, los enumeramos: Se trata de generar una superficie que:

- Cierre el espacio (y aisle interior de exterior).
- Asegure la evacuación de las aguas de lluvia.
- Considere una adecuada iluminación natural.

— Acoja los elementos de iluminación o climatización artificial, asegurando asimismo la accesibilidad a todos los puntos que requieran mantenimiento.

Evacuar las pluviales establece una de las principales relaciones entre estructura y cerramiento: Las formas de la superficie de cerramiento y sus pendientes han de ser compatibles con el material utilizado para la impermeabilización.

Considerar la iluminación natural implica decidir el grado de transparencia de la cubierta, y la orientación de tal transparencia. No es objeto de estas líneas tratar de la iluminación natural, pero baste recordar que eliminar deslumbramientos supone ineludiblemente la iluminación «cenital», y que controlar la incidencia directa de los rayos solares (no sólo por razones de uniformidad de iluminación, sino por razones de climatización) implica en muchos casos orientaciones dominantes en la forma: La luz de Norte es una razonable decisión con muy poderosas implicaciones en la forma final.

Considerar inclusiones y accesibilidad implica reflexionar sobre alternativas en la sección constructiva, es decir en las relaciones de posición entre materiales de cerramiento, estructura y áreas accesibles.

Como se ve, el grado de implicación de la estructura en las anteriores reflexiones exige que deba ser considerada en profundidad desde el principio del diseño.

REQUISITOS ESTRUCTURALES

Los requisitos estructurales son conocidos, y forman una parte importante de lo que en la terminología de la normativa europea se denominan «requisitos esenciales» (1).

Desde el punto de vista de la Estructura, lo que se requiere es asegurar la estabilidad, resistencia y rigidez (limitación en la deformación) frente a los diferentes casos de carga que vayan a presentarse (o pudieran presentarse hipotéticamente) en la vida de la estructura. ¡Eso es todo!

Podemos recordar las componentes de «carga» de mayor relevancia: (Norma Básica MV-101.)

— **Peso propio y cargas permanentes.** Se trata de cargas de muy bajo valor: El peso propio de estructuras desligadas del problema de cerramiento para tamaños pequeños no debe exceder los 10 kg/m^2 , llegando a los 30 kg/m^2 para tamaños grandes. Las cargas permanentes de cerramiento y aislamiento son asimismo de pequeño valor, y pueden estar en los 20 a 30 kg/m^2 con soluciones convencionales, y muchos menos aún en casos no convencionales (cables, lonas, ...).

— **Sobrecargas gravitatorias** (en cubiertas, la nieve básicamente, pudiendo considerarse casi siempre las sobrecargas de uso —mantenimiento— como no simultáneas, y superadas por la anterior). Debe considerarse en todo caso una carga mayor de 40 kg/m^2 incluso donde no nieva nunca. Los valores medios están en torno a los 80 kg/m^2 .

— **Sobrecarga de viento.** En este caso suele ser de mucha mayor relevancia la consideración de la succión del viento que la consideración de la presión, y por ello deben considerarse las direcciones en que aquella es dominante: Por ejemplo, en las sencillas cubiertas a dos aguas resueltas con formas (cerchas),

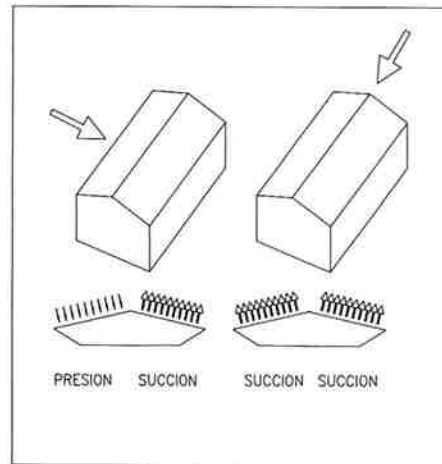


Fig. 1

para el análisis de éstas es mucho más importante la acción del viento de dirección paralela a la cumbre, que la acción de viento de dirección contenida en cualquier ángulo dentro del plano de la forma: En aquella la succión se produce en todos los planos de la cubierta, tendiendo a levantarla, y a invertir la totalidad de los esfuerzos de los elementos estructurales que la sostienen en el caso probable de que la cubierta sea ligera (Fig. 1). Los esfuerzos de tracción se convierten, así, en compresión, pudiendo provocarse colapsos por insuficiente rigidez (pandeo) de elementos que estén concebidos básicamente para trabajar en tracción. Hay que decir que este fenómeno es de especial importancia en la cubierta de espacios abiertos (en que a la succión en la superficie superior hay que añadir la presión en la superficie inferior, siendo éste el caso de las marquesinas).

El problema de la acción dinámica puede ser importante en cubiertas de pequeña rigidez (esbeltas, o de poco «canto»). Merece la pena insistir aquí en que la falta de rigidez de una forma es desfavorable en todos los sentidos: las deformaciones importantes suponen problemas en el uso; una apreciable deformabilidad se asocia a oscilaciones de períodos más largos, más susceptibles de acoplarse dinámicamente a las cargas del viento; además puede demostrarse que si se comparan soluciones estructurales a un mismo problema, las más deformables han de resultar indefectiblemente en soluciones con mayor consumo de material (2).

Finalmente ha de tenerse en cuenta que la forma, e incluso la textura superficial expuesta al viento puede ser de relevancia trascendental en la determinación de los valores de la carga a considerar, especialmente en el caso de las formas curvas.

— Cargas térmicas: El efecto de las mismas puede ser de mucha importancia: siendo las superficies de grandes dimensiones, a menudo no es razonable disponer juntas de dilatación (por razones de tipología estructural, de uniformidad en la solución constructiva...) por lo que las diferencias de longitudes por dilatación o contracción longitudinal de las piezas, las curvaturas provocadas por diferencias de dilatación en fibras opuestas de las mismas piezas... han de provocar esfuerzos que deben considerarse. Cabe señalar que a menudo se producen problemas locales de importancia por la existencia de diferencias importantes en el soleamiento de áreas contiguas de cubierta (zonas en sombra permanente junto a áreas soleadas...).

— Cargas reológicas, por deformaciones diferidas en el tiempo derivadas de la evolución en el comportamiento del material. Su consideración es obligada en estructuras de madera y hormigón, y en éstas, de importancia fundamental en el caso de trabajar con sistemas de pretensado. Han de considerarse asimismo en estructuras de cables, y en textiles.

— Carga de fuego: Ha de preverse la eventualidad de que se produzca un incendio en cualquiera de los sectores de incendio de la edificación. Este produce incrementos de temperatura que, aun afectando a las características mecánicas de los materiales que forman la estructura, no deben suponer la ruina prematura de la misma (que ponga vidas en peligro durante la evacuación o eventualmente en la extinción, si ha de acometerse desde el interior de la edificación). Hay diversas formas de abordar el problema:

1. Asegurar resistencia durante un tiempo prescrito normativamente frente a un ensayo de fuego normalizado (se trata de un ensayo de relación Temperatura-Tiempo preestablecido: curvas ISO 834, UNE 23.093...). Es el método más usual, base de las regulaciones tipo NBE-CPI...
2. Asegurar resistencia frente al fuego del ensayo citado durante un tiempo que se evalúa en función de la severidad del incendio previsible considerando carga de fuego, condiciones de ventilación, propiedades térmicas (de transmisión y disipación) del cerramiento del sector de fuego considerado...) (DIN 18230, CIB W14 1986...).
3. Asegurar resistencia frente a la curva Tiempo-Temperatura que se derivaría de un incendio en el sector considerado obteniendo tal curva mediante las ecuaciones de balance térmico y de masa precisas, establecidas a partir de los datos reales de carga de fuego, ventilación, y propiedades de transmisión y disipación del cerramiento.

En todo caso se tratará de probar que la ruina no se producirá en un incendio de las características del posible en el sector considerado, es decir que el calor generado por el incendio durante el tiempo de desarrollo del mismo no incrementa las temperaturas en la estructura ni altera sus características físicas hasta niveles que supongan su ruina en las condiciones de carga en que se encuentre. Para ello pueden ser precisas o no protecciones para la estructura, según el tipo de incendio, de recinto y de estructura. Como se ha visto, juegan en el análisis un importante papel la Carga de fuego, las condiciones de ventilación, y las condiciones de transmisión de calor del envoltorio del recinto incendiado (cabe citar diversos incendios experimentales. En (3) se reseña un interesante caso en que, en edificios idénticos, una ventilación forzada de la zona incendiada suponía temperaturas mucho menores: 170° frente a 590° a 7 m de altura a los ocho minutos del inicio del fuego).

De entre las cargas indicadas, es usual considerar las cargas gravitatorias como base de los diseños preliminares (salvo en el caso de soluciones extremadamente ligeras), dada su mayor incidencia, analizando la incidencia del resto de las cargas una vez adoptadas tipología, forma y dimensiones generales.

Puesto que en general se habla de soluciones ligeras, el peso propio de la estructura es de gran relevancia en la determinación de las cargas permanentes. Hablaremos, pues, a continuación de los materiales estructurales en función de la incidencia del peso propio en las soluciones de cubierta.

MATERIALES ESTRUCTURALES

El peso propio de la estructura es de la mayor importancia en la definición de las cargas, por lo que hemos de analizar los materiales en función de tal peso. Pero, como obviamente no cabe considerar el peso aisladamente de la resistencia, el análisis se hace considerando cada una de las soluciones estructurales posibles. Ahora bien, el análisis realizado sobre tipos concretos puede generalizarse a características propias de los materiales e independientes del tipo estructural. Es fácil realizar un análisis esquemático (y teórico) de las características de un arco o un soporte realizado con diferentes materiales. En tal análisis, y en cualesquiera otros que se realicen sobre tipologías diferentes, resultan como factores de importancia crucial los valores asociados de peso específico τ (t/m^3) y resistencia σ (t/m^2). Las relaciones fundamentales dependen básicamente de $A = \sigma/\tau$ (m), magnitud que podemos denominar «Alcance» del material, que determina la idoneidad mecánica de un material para construir estructuras que soporten el propio peso (4).

Podemos ver en la tabla siguiente que los materiales tradicionales idóneos para cubierta son acero y madera, quedando el resto en clara desventaja. Puede también observarse la idoneidad por sus elevados costos. (Los valores indicados son valores medios correspondientes a rotura.)

Material	τ g/cm ³	σ kg/cm ²	E T/cm ²	A = σ/τ m	E/ τ km
Acero A-42	7,86	4200	2100	5343	2671,7
Acero A-220	7,86	22000	2100	27989	2671,7
Aluminio	2,75	1576	720	5732	2618,1
Titanio	4,51	4968	1120	11015	2483,3
Hormigones normales	2,50	300	200	1200	800,0
Hormigones ligeros especiales	1,80	500	230	2777	1277,7
Maderas	0,69	900	123	13043	1782,6
Poliéster con fibra Vidrio	1,70	3500	260	20588	1529,4
Fábricas de Ladrillo Macizo	1,80	140	253	777	1405,6

Los valores de $A = \sigma/\tau$ en servicio de Hormigón armado, madera y Acero son del orden de 500, 1.500 y 2.200 m.

En los materiales elegidos son aplicables todas las técnicas constructivas conocidas, en las que no vamos a entrar en detalle, pues cada una por sí constituiría un curso completo de construcción.

Cabe citar como técnicas a considerar, en hormigón, el proyectado contra cimbras formadas por membranas hinchables u otras, el pretensado y predeformado.

En acero, debe señalarse la especial incidencia de los nudos, siendo interesantes las soluciones que a sus propios problemas aporta la industria náutica. Así pues, será importante estudiar técnicas apropiadas a uniones especiales, cables, etc.

La madera va a extenderse en el futuro con la implantación del Mercado Unico, y va a exigir un importante esfuerzo de adaptación a profesionales de todo orden dado el olvido al que se la ha relegado en España durante mucho tiempo. Los laminados, las estructuras mixtas (madera/acero fundamentalmente, pero cabe pensar en madera/hormigones ligeros, etc.) pueden aportar soluciones interesantes.

No entraremos en tales temas, de modo que una vez considerados los materiales, vamos a centrarnos en la revisión de las tipologías estructurales que pueden tenerse en cuenta.

TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES PARA CUBIERTAS DE GRANDES LUCES

Pueden considerarse dos grandes familias de tipos de estructuras para cubiertas: aquéllas en que la estructura está contenida en la superficie de la cubierta, y que por lo tanto trabaja globalmente recurriendo a esfuerzos contenidos en dicha superficie (comportamiento predominante de esfuerzos axiales: tracción-compresión, como en arcos, láminas, redes de cables), y aquéllas no contenidas en tal superficie, y que por lo tanto recurren en gran medida a esfuerzos de flexión (el caso de las vigas y las placas, o estructuras asimilables a éstas, como emparrillados, mallas espaciales de poca o nula curvatura...) (Fig. 2).

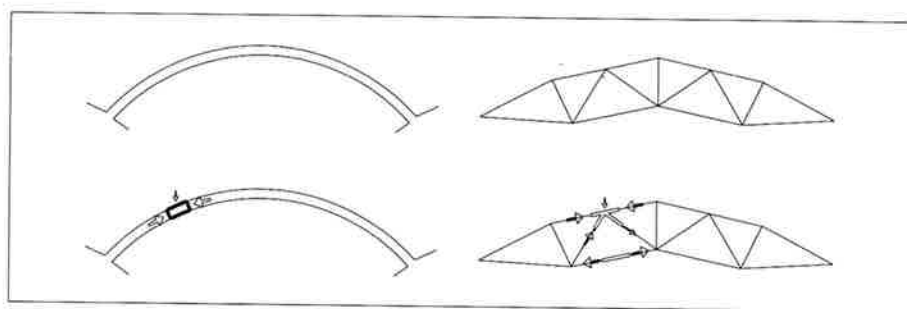


Fig. 2

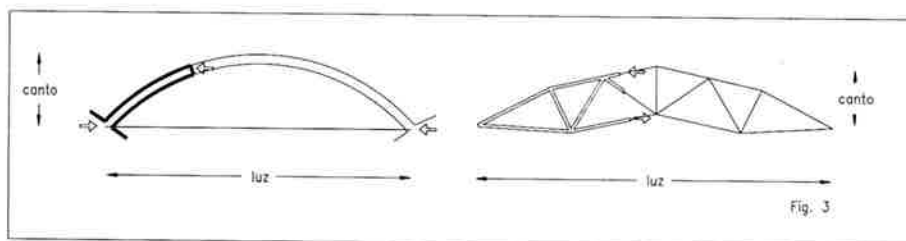


Fig. 3

En puridad todo problema estructural que transmita cargas fuera de su dirección implica realmente un problema de flexión, y por lo tanto un problema en el que implícitamente existe una pareja de esfuerzos (tracción y compresión) situadas a distancia entre sí («canto»). Ahora bien, en la primera tipología citada la flexión global se resuelve mediante tracciones y compresiones situadas en áreas diferenciadas de la estructura, y recurriendo a menudo explícitamente a componentes horizontales aportadas por el terreno o por atirantados especializados diferenciados de la propia estructura de cubierta, mientras que en la segunda tipología, tales componentes forman parte «visible» del esquema resistente en todas las áreas de la estructura (ambas componentes del par de fuerzas que constituye la flexión se equilibran y resisten en forma similar) (Fig. 3).

Los parámetros geométricos fundamentales, para cualquiera de ambas tipologías son la luz salvada (distancia entre apoyos), el «canto» global (distancia entre las direcciones de las componentes del par de flexión (sea éste implícito o explícito) en el punto de mayor esfuerzo, es decir, en el centro del vano en soluciones apoyadas, o sobre el apoyo en soluciones continuas o en voladizo), y finalmente la condición de apoyo, ya sea sobre puntos aislados, o continua sobre el contorno. (Debe entenderse esto en términos de la geometría global: una estructura de planta cuadrada apoyada en sus cuatro vértices puede considerarse apoyada sobre puntos aislados, mientras que si el apoyo es sobre 12 puntos en su contorno (cuatro puntos en cada uno de sus lados), el comportamiento estructural global se aproxima en gran medida al caso en que el apoyo se realiza sobre el contorno.)

La relación luz/canto se denomina esbeltez. Sus valores razonables dependen de la tipología, pero se trata de valores bastante estables, que podemos situar en el intervalo de 4 a 16. Es posible usar mayores valores, pero no aconsejable por coste, deformabilidad, etc. Es más, cabe afirmar casi sin discusión que la mejor esbeltez posible es la menor posible compatible con el resto de los problemas del diseño: Las esbelteces óptimas suelen ser menores que las que implican formas aconsejables por razones acústicas, o que las que

minimizan las áreas de cerramiento, etc. Corresponden los valores pequeños de esbeltez a casos de la primera de las tipologías citadas, los grandes, a soluciones continuas de la segunda tipología. Cada tipología tiene su valor óptimo, y su campo de aplicación (en relación con la esbeltez), campo en el que es mejor que las otras desde el estricto punto de vista del consumo de material. Sin que pueda hacerse una regla fija de ello, cabe señalar en términos generales la mayor idoneidad de las soluciones básicamente «en flexión» para grandes esbelteces, y de las soluciones «en compresión» (arcos...) para pequeñas, con la esbeltez de 8 como valor próximo al del cambio en la ventaja de unas frente a otras.

Establecer una correcta esbeltez, derivada de una forma que se adecúe al resto de los problemas de diseño presentes en el problema, es una de las cuestiones centrales desde el punto de vista de la estructura.

Apoyos continuos sobre la totalidad del contorno dan lugar a esfuerzos más repartidos sobre la estructura (y con valores máximos de valor apreciablemente menor a los derivados de apoyos puntuales). Sin embargo los apoyos continuos sobre el contorno implican tipologías con comportamiento no reducible a comportamiento plano (no se puede descomponer en suma de elementos planos similares para cada dirección) y por lo tanto supone mayores problemas para lograr resolver la cubierta mediante elementos repetidos.

A) Estructuras de comportamiento «laminar»

En las figuras que se acompañan pueden observarse diferentes clases de estructuras de este tipo, cuya ejecución puede ser en material continuo, o mediante un sistema de barras diferenciadas. El primero es el caso de las estructuras laminares de hormigón, o de estructuras de tableros de madera; el segundo, el caso de estructuras formando malla en acero o madera. Entre éstas pueden citarse:

Estructuras rígidas

— Láminas, que pueden ser (Fig. 4):

- a) Cilíndricas, de sección abovedada, si bien, para trabajar en forma laminar han de apoyarse en tímpanos perpendiculares a su directriz. El ejemplo paradigmático fue el Frontón Recoletos, de Eduardo Torroja. Su comportamiento global recuerda al de grandes vigas de sección igual al de la generatriz de la lámina.
- b) De revolución (cúpulas), que pueden visualizarse en parte como familias de arcos en direcciones ortogonales, cuyos empujes son equilibrados, según sean las curvaturas, bien por los anillos de apoyo, bien por anillos de la propia lámina.
- c) Paraboloides (sillas de montar), que pueden verse como familias cruzadas de arcos (con la convexidad hacia arriba) y cables (concavidad hacia arriba).

Se trata, como de ve, de superficies de doble o simple curvatura trabajando en todos sus puntos en dos direcciones transversales. Basan su eficacia en el comportamiento denominado «de membrana», que permite, con condiciones de apoyo adecuadas en el contorno, equilibrar variadas leyes de carga mediante los solos esfuerzos axiales y tangenciales, esfuerzos contenidos en la superficie que constituye la forma. Los esfuerzos tangenciales permiten la adapta-



Fig. 4

ción de las leyes de esfuerzos axiales a las necesarias para el equilibrio de los diferentes casos de carga que puedan presentarse. Pese a ello ha de considerarse siempre la existencia de flexiones locales. Estas se derivan de la dificultad de lograr con precisión en los elementos del contorno los esfuerzos y el movimiento que precisería el equilibrio de la «membrana». La menor rigidez de forma de las láminas de simple curvatura supone en ellas una incidencia mayor de flexiones. Las áreas comprimidas deben dimensionarse considerando la necesidad de impedir el pandeo local, lo que implica limitaciones al valor mínimo del espesor local en relación con la curvatura de la lámina en cada punto: La expresión más clásica de la deformación crítica de pandeo en láminas es $\varepsilon_{cr} = \alpha/\lambda$ siendo α un coeficiente dependiente del tipo de superficie y de la forma de aplicación de la carga, que oscila en los casos normales entre 0,1 y 0,3, y siendo λ la esbeltez local R/t (Radio de curvatura partido por espesor) (5). De este modo, limitar la deformación a valores suficientemente alejados de la deformación crítica implica limitar la esbeltez local. Si consideramos que la deformación en rotura de los materiales utilizables ronda el 2 ‰, y establecemos como límite a la deformación crítica idéntico valor, resultan unas esbelteces locales límites en el orden de 100. (El análisis detallado del pandeo no es sencillo, y en todo caso las expresiones de los diversos autores presentan apreciables diferencias, por lo que no es descabellado el uso de valores de coeficientes de seguridad netamente superiores (2 a 3 veces) a los usuales: En láminas de hormigón no es especialmente conservador considerar tensiones de servicio entre los 20 y los 30 kg/cm².)

Un caso peculiar de láminas es el correspondiente a formas poliédricas, o procedentes de superficies prismáticas (plegadas), que corresponden a despieces planos (inscritos o circunscritos) de las formas precedentes, y cuyo comportamiento es parcialmente de placa o viga para cada elemento plano (equilibran las cargas localmente en flexión), sumado al laminar, o global, para el conjunto de todos ellos (llevan las cargas a los apoyos globalmente como láminas, mediante esfuerzos axiales).

— Bóvedas y arcos (Fig. 5). Se sostienen básicamente mediante esfuerzos axiales en una sola dirección. Su comportamiento se basa en la existencia de empujes horizontales que deben estabilizarse con elementos o cimientos apropiados. No son especialmente adecuadas al tipo de cargas a considerar en cubiertas: son apropiadas para cargas de ley muy estable, y se diseñan con formas correspondientes al antifunicular de las mismas. Para cargas cuyo antifunicular adopta forma diferente a la de la directriz de la estructura han de soportar flexiones locales de cierta consideración. Por ello han de preverse con rigidez suficiente para éstas, que inevitablemente aparecen considerando hipótesis de cargas alternativas.

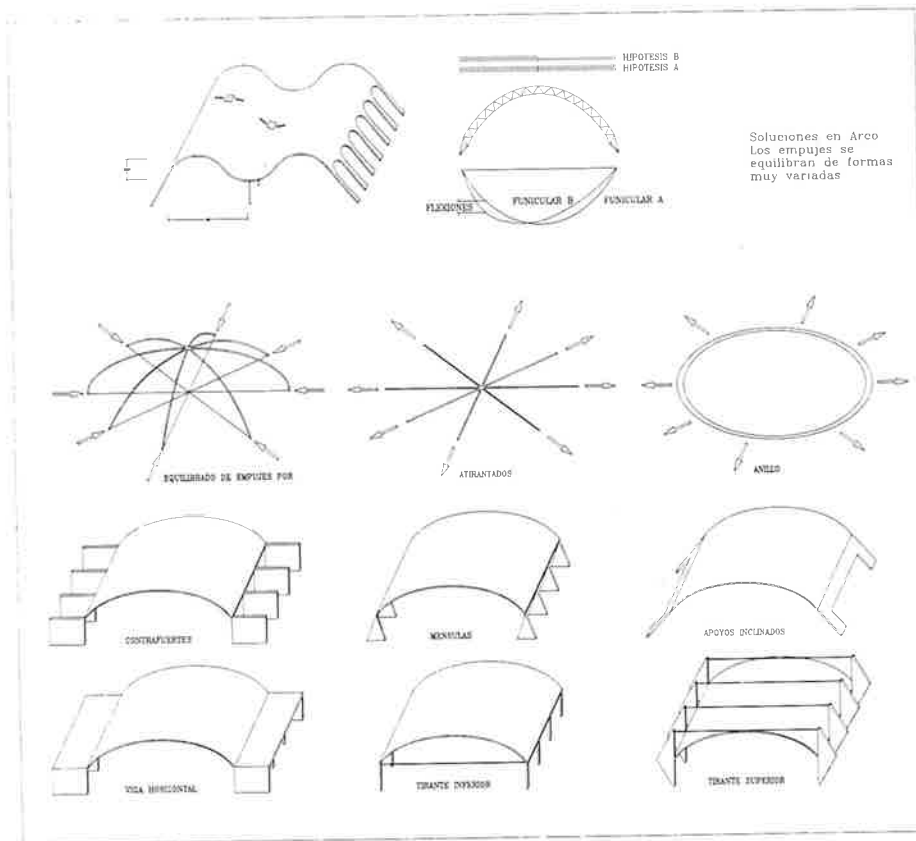


Fig. 5

Pueden alcanzarse con los tipos citados luces apreciables (soluciones para 15 a 20 m con superficies de simple curvatura, y del orden del doble con doble curvatura son extremadamente fáciles. Tales luces pueden aumentarse considerablemente utilizando sistemas de doble capa para el equilibrio de las flexiones locales).

Estructuras flexibles

— Membranas, o redes de cables (Fig. 6). Se diferencian en el comportamiento de idénticas formas rígidas en dos aspectos: en primer lugar no hacen uso de los esfuerzos tangenciales para adaptar las leyes de esfuerzos internos a las precisas para el equilibrio, y por otro, su poca rigidez les incapacita para recurrir a flexiones locales. Se adaptan a las variaciones de carga mediante variaciones apreciables de forma. Estas variaciones pueden ser de gran importancia, llegando en casos de inversión de esfuerzos entre hipótesis de carga alternativas a poderse dar fenómenos de inversión de la curvatura. Mantener la mayor estabilidad de forma posible (imprescindible si ha de asegurarse la supervivencia del cerramiento asociado a la estructura), exige siempre la introducción de esfuerzos iniciales (pretensado), y por lo tanto la consideración de dos familias de elementos que puedan tensarse una contra la otra (Fig. 7). Cada una de estas familias puede corresponder al mismo o diferente tipo estructural. Puede tensarse mediante métodos activos: con cables, o con vigas transversales a la estructura principal, o mediante métodos indirectos, imponiendo externamente deformaciones iniciales que superen a las previsibles y añadiendo en esa situación nuevos elementos a la estructura predeformada,

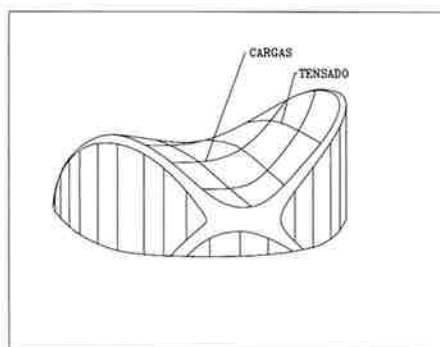


Fig. 6

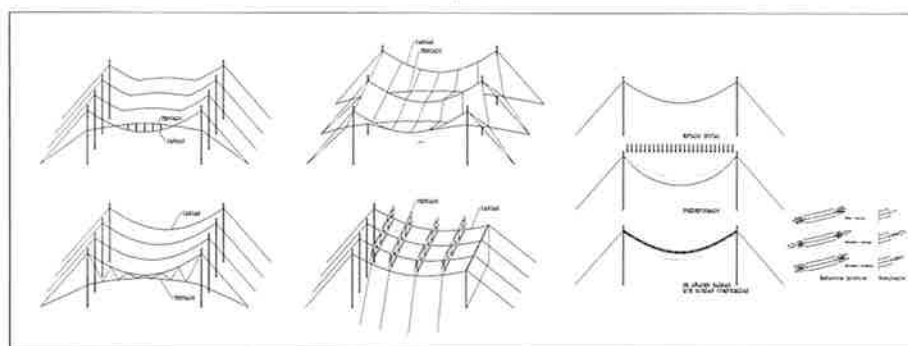


Fig. 7

elementos que entran en carga al liberarse la acción externa. Si las dos familias son de cables, la oposición en la concavidad entre ambas lleva inevitablemente a soluciones en paraboloides hiperbólicos. Pretensar implica aumentar tracciones, y en la misma medida aumentar las compresiones, si bien éstas pueden llevarse a elementos especializados, tanto más eficaces cuanto mayor es la concentración de carga en los mismos: diluir las compresiones lleva a sobredimensionados mayores por problemas de inestabilidad (pandeo). Como alternativa a esta concentración existe la posibilidad de disolución total de la compresión en fluidos envueltos por superficies tensadas (Fig. 8): Tenemos aquí a las estructuras hinchables, bien las de simple capa, en las que la carga es soportada por el aire comprimido, que es mantenido en situación (pretensado) por la membrana exterior, bien las de doble capa, menos claras como alternativas que las anteriores, por requerir grandes presiones, y materiales de mucha menor deformabilidad (existen entre otras soluciones las lenticulares realizadas con chapa de acero y aire comprimido, si bien son de mantenimiento incierto).

La deformabilidad de todas las estructuras citadas tiene fuertes implicaciones en el tipo y solución constructiva del material de cerramiento.

El comportamiento de las estructuras «laminares» en cualquiera de los tipos citados exige que exista curvatura. La necesidad de curvatura juega a favor del uso de la propia estructura como material de cerramiento, pues impone importantes restricciones al tipo de material de cerramiento a utilizar, que debe adaptarse a la misma. Los problemas de adaptación son dos: por un lado el correspondiente a la definición geométrica del despiece, que puede eliminar prácticamente las soluciones estándar industriales más generalizadas (paneles sandwich, etc.), por otro los derivados de la adaptación a la curva, que elimina los elementos planos y rígidos que superen un cierto tamaño. La dificultad es

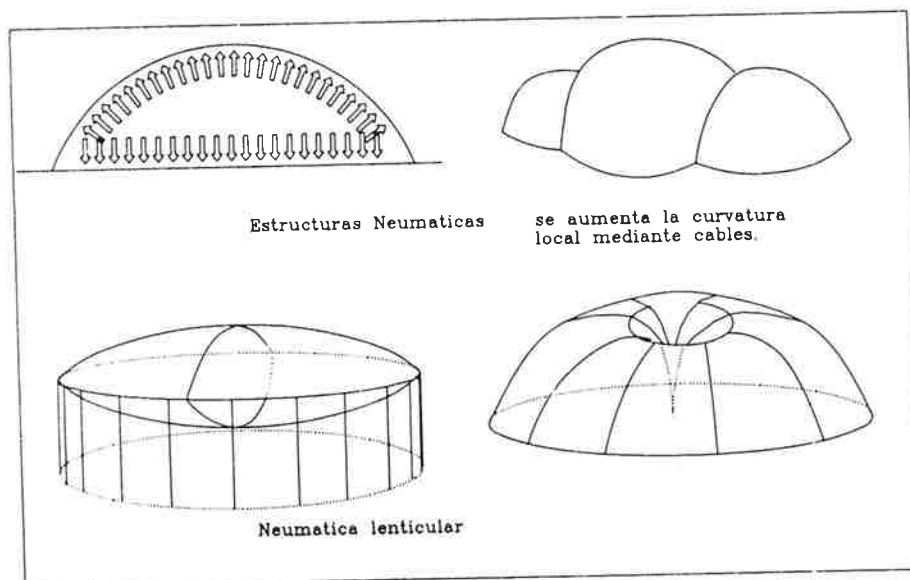


Fig. 8

mayor en el caso de superficies de doble curvatura: Es imprescindible en este caso realizar un serio estudio de los diferentes tipos de elementos distintos a utilizar. Es usual utilizar formas generadas a partir de los poliedros regulares, debido a la mayor facilidad geométrica que éstos presentan, y a que su «regularidad» permite el uso repetido de unos pocos elementos diferenciados. En particular, las cúpulas esféricas se despiezan en poliedros derivados del icosaedro. La fabricación flexible podrá, en su día, facilitar la realización de formas más versátiles, y con mayor número de elementos distintos.

La curvatura de la forma supone asimismo importantes implicaciones en plantas y secciones: No es posible adoptar cualquier tipo de superficie con cualquier planta, siendo las formas más preferibles desde el punto de vista mecánico (las de doble curvatura) formas que obligan a la planta a adaptarse a ellas más bien que al contrario.

Las soluciones citadas exigen usualmente la existencia de elementos estructurales fuera de la superficie para equilibrar las fuerzas horizontales de la «flexión». Tales elementos (estribos en arcos, anillos de tracción o compresión en cúpulas y redes de cables...) son elementos de gran responsabilidad, y han de ser estudiados cuidadosamente.

B) Estructuras flectadas

En las figuras pueden observarse diferentes tipos de estructuras en flexión, que corresponden a diferentes opciones de alguno de los tres tipos básicos de estructuras en flexión (Fig. 9): Placa (con rigidez a flexión en todas las direcciones), Emparrillado (con rigidez a flexión en solo dos direcciones transversales) y Viga (rigidez o comportamiento en flexión en solo una dirección. En este último caso se trata de estructuras que pueden descomponerse en planos, siendo cada viga el resultado de una descomposición de este tipo). Todas ellas son estructuras con rigidez de forma, y pueden en principio materializarse mediante soluciones continuas (alma llena, etc.) o mediante soluciones discontinuas (triangularización). Las implicaciones derivadas del peso propio descartan totalmente en cubiertas a las soluciones continuas, en las que canto implica peso.

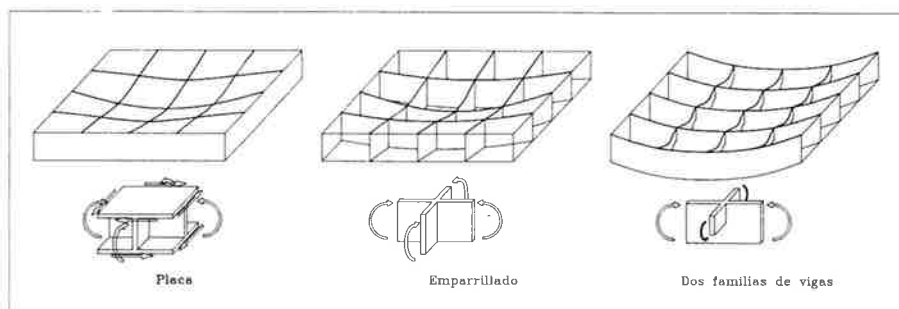


Fig. 9

La versatilidad formal de esta tipología es evidente, si bien implica una ocupación espacial de importancia mucho mayor que la anterior. En ellas usualmente se recurre a superficies de cerramiento planas o formadas por grandes paños planos que permitan el uso de elementos industriales: Un panel sandwich de chapa y aislamiento puede cerrar sin cortes paños de 12 m de longitud, con las ventajas que ello supone de impermeabilidad, amén de la facilidad de montaje.

La organización de la estructura se halla muy ligada aquí a la dirección de evacuación de las aguas, especialmente si se utilizan cerramientos del tipo citado.

El comportamiento de Placa (o asimilable a ésta) permite flexibilizar la situación de los apoyos, a cambio de una importante complejidad, no sólo geométrica, sino también mecánica, por el elevado número de elementos sometidos a esfuerzos de valor diferente. Puede existir tal comportamiento en ciertos casos de estructuras de malla espacial de doble capa, básicamente para estructuras basadas en mallas de planta triangular (Fig. 10). Existe gran variedad de soluciones a los problemas de geometría de los nudos (Fig. 11). En todo caso el elevado número de barras que confluyen en cada nudo en esta tipología complica en elevada medida su definición y montaje, siendo más usuales las estructuras de la tipología que se describe a continuación.

El comportamiento de emparrillado es el resultante de la existencia de dos familias de vigas transversales entre sí de rigidez similar (por canto y condiciones de apoyo). En este caso la distribución de las cargas entre las dos familias se rige por la condición de compatibilidad en el descenso en los puntos de conexión entre ambas. Este comportamiento corresponde además de a los casos evidentes de vigas cruzadas, a las Mallas espaciales basadas en mallas de planta cuadrada (Fig. 12), dada la nula rigidez a torsión de éstas. Se trata de soluciones geométricamente más sencillas que las del tipo anterior, si bien subsisten altas diferencias en el comportamiento mecánico de cada una de sus partes en el caso de no existir importantes simetrías.

El comportamiento de viga (Fig. 13), finalmente, es el que corresponde a la mayor parte de las soluciones, en las que el trabajo de la estructura se descompone en dos direcciones, usualmente ortogonales entre sí, repitiendo la solución de cada dirección en diferentes planos, paralelos entre sí.

La versatilidad de estas familias tipológicas puede hacerse patente sin más que revisar las muchas soluciones que se han ideado a lo largo de la historia. Las figuras que han sido incluidas hasta aquí no presentan siquiera un limitado panorama de éstas.

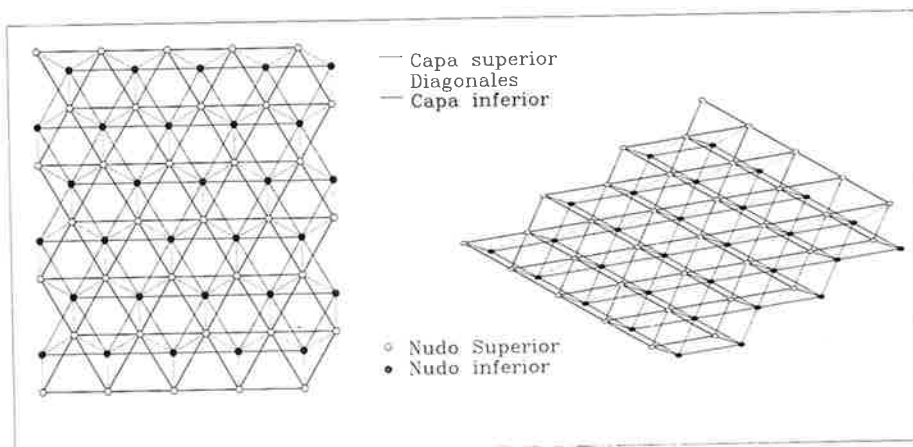


Fig. 10

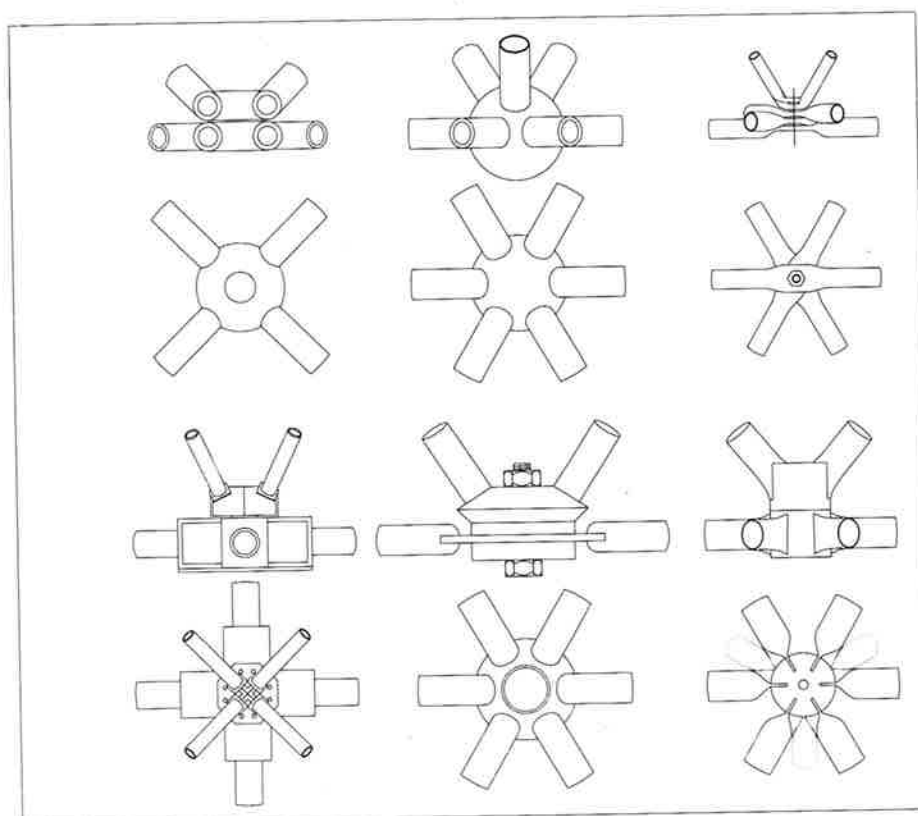


Fig. 11

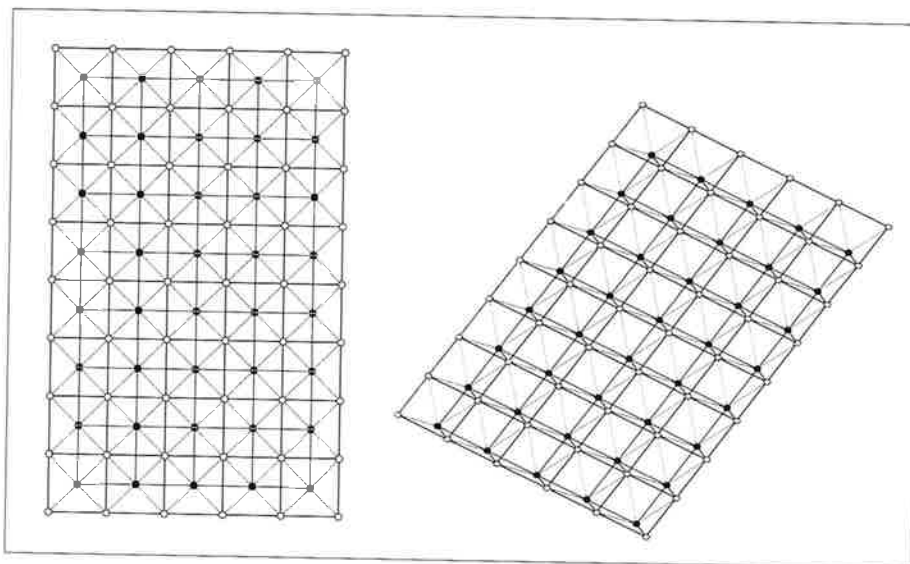


Fig. 12

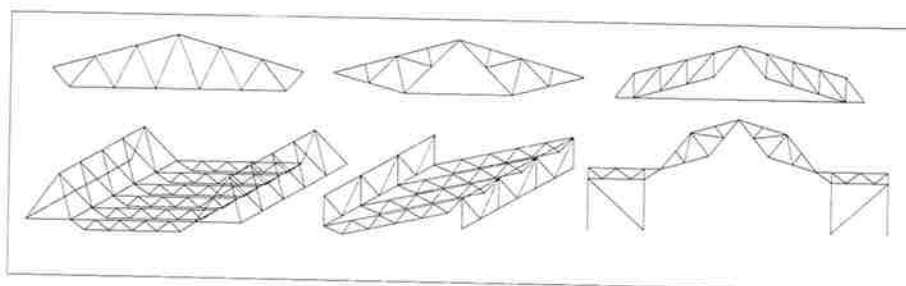


Fig. 13

LAS JUNTAS DE DILATACION

Son conocidos los problemas que pueden presentar construcciones muy rígidas por coacciones a los movimientos térmicos. En edificación es usual limitar tales movimientos mediante la disposición de juntas de dilatación (utilizando dimensiones máximas del continuo edificado en torno a los 30 m).

Sin embargo, en estructuras de una cierta entidad esto es impensable, considerando la imposibilidad de situar apoyos intermedios según las zonas: resulta más complicado y caro multiplicar elementos independientes que asumir, y resolver la compatibilidad de movimientos de grandes elementos. Hay dos estrategias posibles:

1. Puede optarse por coaccionar básicamente el movimiento manteniendo los esfuerzos que se originan en límites resistidos por los materiales. Dos ejemplos ilustran las posibilidades del método: en la solución adoptada en los actuales rieles de ferrocarril, el alargamiento que se produciría en la dilatación se compensa uniformemente en todo el riel por el acortamiento derivado del esfuerzo de compresión que se produce en el mismo. Este está arriostrado (frente a pandeo) por las traviesas, de modo que una diferencia de un grado de temperatura no supone más que una diferencia de 22 kg/cm^2 en la tensión a que está sometido el riel. En ciertas soluciones de pórticos a dos aguas repetidos, la coacción se produce impidiendo los movimientos en los extremos del pórtico, de modo que la dilatación produce sencillamente esfuerzos de flexión en las piezas inclinadas del pórtico. Estos se acumulan a los esfuerzos derivados de otras causas, y basta que las secciones puedan resistirlos (Fig. 14).
2. Como alternativa, puede permitirse que se produzca el movimiento con libertad. En este caso los movimientos relativos totales acumulados en las juntas extremas pueden consistir en traslaciones, si bien son a menudo más aconsejables soluciones que acumulen movimientos de rotación. Pueden resolverse traslaciones de partes separadas de estructura mediante conexiones fijas en tracción de poca rigidez, o mediante elementos en compresión de poca rigidez en las uniones (rótulas reales o elementos de unión que admitan ligeras flexiones. Suelen denominarse «péndulos» a tales elementos). Como se ve, en estas soluciones pueden posibilitarse los movimientos sin necesidad de complicados «aparatos móviles» (Fig. 15).

LAS CONDICIONES DE APOYO

Si intentamos esquematizar el comportamiento de una estructura en sección, tenemos dos formas extremas contrapuestas de solución: (Fig. 16). La solución apoyada, y la solución en voladizo (en doble voladizo si es simétrica). Ambas soluciones corresponden a dos formas diferentes de «apoyar» la gráfica de momentos de las cargas de cubierta. La primera implica que la flexión se resuelve en su totalidad en la estructura de cubierta. La segunda hace intervenir la estructura de soporte en la flexión, salvo que sea posible compensar momentos en voladizos contiguos. Desde el exclusivo punto de vista de la estructura «horizontal» esta segunda opción da lugar a estructuras más económicas en principio (para esbelteces adecuadas), exigiendo «soportes» más rígidos y costosos que la primera. La estabilidad frente a cargas horizontales queda confiada a dichos elementos de soporte, al suponer en éstos esfuerzos de tipo similar a los que aparecen en ellos por la flexión (asimétrica) derivada

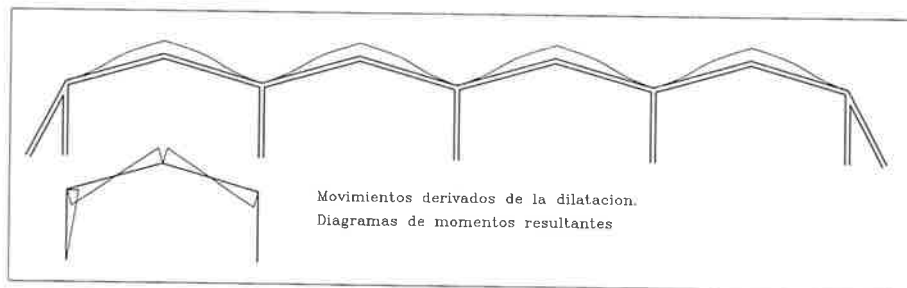


Fig. 14

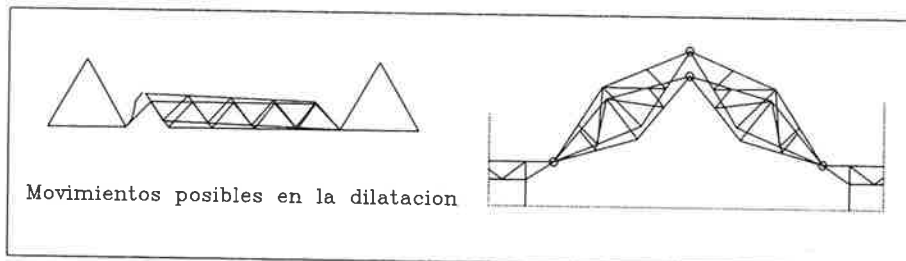


Fig. 15

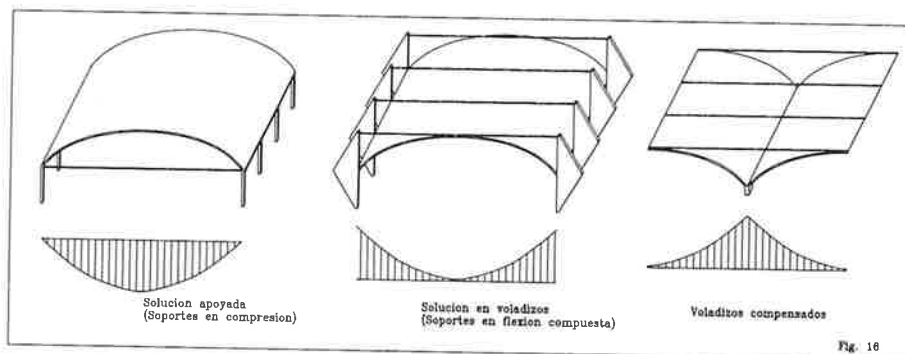


Fig. 16

de las cargas verticales. En la primera de las soluciones puede optarse por estabilizar la estructura apoyándose en dichos soportes, pero es posible igualmente establecer paños triangulados arriostrantes. Si se trata de soluciones de grandes dimensiones, en las que se han eliminado las juntas para dilatación, mediante alguna de las soluciones indicadas más arriba, es inevitable estabilizar por medio de los soportes, por lo que éstos son fácilmente elementos complejos de grandes dimensiones, y cuya adecuada concepción es imprescindible: Se tratará en la mayor parte de los casos de soportes de sección compuesta. Los elementos de la sección se atan mediante cualquiera de los medios usuales: triangulación, «empesillado», si bien en este caso, al tratarse de grandes dimensiones las soluciones no admiten presillas, exigiéndose perfiles para el atado: en todo caso tales «soportes» pueden considerarse comportándose localmente como pórticos en forma análoga a los soportes empesillados usuales.

TRIBUNAS Y GRADERIOS

Los problemas de tribunas y graderíos son de orden diferente a los considerados en cubiertas: aquí se trata de soportar cargas de uso de elevado valor: 500 kg/m². Por otro lado, la forma del espacio determina a la forma de la estructura: las secciones se derivan de problemas de visibilidad, y éstas determinan la forma de la estructura. Las soluciones son menos variadas.

Cabe citar las soluciones que implican movilidad de los graderíos (que exigen de inmediato soluciones constructivas muy ligeras). Las más fiables mueven elementos de grada de grandes dimensiones, y para permitir el movimiento se basan, bien en soluciones procedentes de la industria ferroviaria, bien en métodos de apoyo sobre colchones de aire, como medio de minimizar rozamientos. Las soluciones de graderíos retráctiles, desmontables en pequeños elementos, etc. son soluciones costosas y de mantenimiento incierto, por lo que pueden desaconsejarse.

En este caso las gradas se realizan con estructura de acero y revestimientos diversos (la madera ignifugada puede ser una excelente solución).

Los graderíos fijos pueden resolverse con medios muy diversos. Cabe citar como solución clásica la de pórticos de hormigón transversales a la grada y gradas (prefabricadas) apoyadas sobre los mismos, de sección resistente adaptada a la sección precisa por el uso. La organización de los pórticos transversales va asociada esencialmente a la situación de los vomitorios cuando éstos existen, por lo que éstos implican de ruptura de la grada.

Notas

1. Directiva 89/106/CEE de 21 de diciembre de 1988 sobre aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas... sobre los productos de construcción.
Extractamos la descripción de dichos «requisitos esenciales»:
«... Sin perjuicio del mantenimiento normal, dichos requisitos deberán cumplirse durante un período de vida económicamente razonable. Como regla general, dichos requisitos tienen en cuenta acciones previsibles.
 1. Resistencias mecánicas y estabilidad:
Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que las cargas a que puedan verse sometidas durante su construcción u utilización no produzcan ninguno de los siguientes resultados:
 - a) Derrumbe de toda o parte de la obra.
 - b) Deformaciones importantes en grado inadmisibles.
 - c) Deterioro de otras partes de la obra, de los accesorios o del equipo instalado, como consecuencia de una deformación importante de los elementos sustentantes.
 - d) Daños por accidente de consecuencias desproporcionadas respecto a la causa original.
 2. Seguridad en caso de incendio:
Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que, en caso de incendio:
 - a) La capacidad de sustentación de la obra se mantenga durante un período de tiempo determinado.
 - b) La aparición y propagación del fuego y del humo dentro de la obra estén limitados.
 - c) La propagación del fuego a obras vecinas esté limitada.
 - d) Los ocupantes puedan abandonar la obra o ser rescatados por otros medios.
 - e) Se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.
 3. Higiene, salud, y medio ambiente:
Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:
 - a) Fugas de gas tóxico.
 - b) Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire.
 - c) Emanación de radiaciones peligrosas.
 - d) Contaminación o envenenamiento del agua o del suelo.
 - e) Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos.
 - f) Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.
 4. Seguridad de utilización:
Las obras deben proyectarse y construirse de forma que su utilización o funcionamiento no supongan riesgos inadmisibles de accidentes como resbalones, caídas, colisiones, quemaduras, electrocución o heridas originadas por explosión.
 5. Protección contra el ruido:
Las obras deben proyectarse y construirse de forma que el ruido percibido por los ocupantes y las personas que se encuentren en las proximidades se mantengan a un nivel que no ponga en peligro su salud y que les permita dormir, descansar y trabajar en condiciones satisfactorias.
 6. Ahorro de energía y aislamiento térmico:
Las obras y sus sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación deberán proyectarse y construirse de forma que la cantidad de energía necesaria para su utilización sea moderada, habida cuenta de las condiciones climáticas del lugar, y de sus ocupantes.
2. Jaime Cervera, «Tres teoremas fundamentales en el diseño de estructuras» *Informes de la Construcción*, n.º 399, enero-febrero, 1989, págs. 57-66.
3. Jesús Obeso, «¿Ventilación de Naves industriales incendiadas?», en *La construcción y el fuego*, fundación MAPFRE, Madrid, 1982.
4. Jaime Cervera, «Las estructuras y el Peso propio» *Informes de la Construcción*, n.º 407, mayo-junio, 1990, págs. 73-85.
5. Kollar y Dulacksa, *Buckling of Shells for engineers*, Budapest, 1984.

Bibliografía

Textos sobre tipología Estructural:

- Eduardo Torroja, *Razón y Ser de los tipos Estructurales*, Madrid, IETCC.
H. Werner Rosenthal, *Structural Decisions*, London, 1962.
Heinrich Engel, *Sistemas de Estructuras*, Madrid, 1978.

Textos sobre estructuras espaciales, Mallas...

- J. Margarit, C. Buxadé, *Las Mallas espaciales en la Arquitectura*, Barcelona, 1972.
Makowsky, *Analysis Design and Construction of Braced Barrel Vaults*, New York, 1985.
Analysis Design and Construction of Braced Domes, Cambridge, 1985.
Makowsky, *Analysis Design and Construction of Double Layer Grids*, London, 1984.
Space structures for Sports Buildings. Proc. Inter. Coll. Space Structures, London, 1987.

Redes de cables

- Szabo y Keller, *Structural Design of Cables-suspended roofs*, Budapest, 1984.
Bucholdt, *Introduction to Cable roof Structures*, Cambridge, 1985.

Placas, Láminas, membranas, y otros

- Flügge, *Stresses in Shells*, New York, 1973.
Beluzzi, *La Ciencia de la Construcción*, vol. III, Madrid, 1977.
Thomas Herzog, *Construcciones neumáticas*, Barcelona, 1977.