

# Proyecto de cubierta retráctil para un centro de San Sebastian

J. MARTÍNEZ APEZTEGUÍA

LANIK  
INGENIEROS S.A.

El presente trabajo describe un sistema desarrollado para la construcción de cubiertas de planta circular que pueden descubrirse parcialmente en su zona central. Este sistema se ha aplicado recientemente al proyecto de cubierta para un coliseo de 100,3 m. de diámetro que está próximo a construirse en San Sebastián. En el artículo se exponen las soluciones concretas aplicadas en este proyecto, tanto a nivel de estructura como de los elementos que materializan la apertura y cierre de la cubierta.

It is presented in this work a construction system developed for circular roofs with openings in its center part. This system has been recently applied to the construction of the roof of a coliseum of 100.3 m. of diameter located in the city of San Sebastian. This paper also describes particular solutions regarding the structure as well as the element that allows the opening and closing of the roof.

En la mayor parte de las poblaciones españolas con más de 30.000 habitantes existe una **plaza de toros**. El aforo de estos edificios suele oscilar entre 2.000 y 25.000 espectadores y su diámetro exterior entre 50 y 120 m. Prácticamente en la totalidad de los casos estos recintos son descubiertos ya que resulta consustancial con el espectáculo su celebración a cielo abierto. Este hecho impide la utilización de estos edificios para un gran número de eventos cuya celebración no podría realizarse con una climatología incontrolada.

En consecuencia, la rentabilidad de estas construcciones resulta extraordinariamente baja. Muchos gestores de plazas de toros se han planteado la posibilidad de cubrirlas, pero el mantener su finalidad original implica que las cubiertas puedan descubrirse, al menos parcialmente. Esta problemática se ha estrellado permanentemente con el inconveniente que supone el alto coste de estas instalaciones.

El proyecto de una nueva Plaza de Toros en San Sebastián ha propiciado un estudio de rentabilidad que ha demostrado la conveniencia de dotarla de una cubierta retráctil. Hasta la fecha son escasas las experiencias concretas en que se han realizado cubiertas retráctiles de grandes dimensiones, entendiéndose por tales las que superan los 50 m de luz libre, si bien hay realizaciones más frecuentes con sistemas más o menos estandarizados para recintos de dimensiones inferiores, utilizados preferentemente en piscinas.

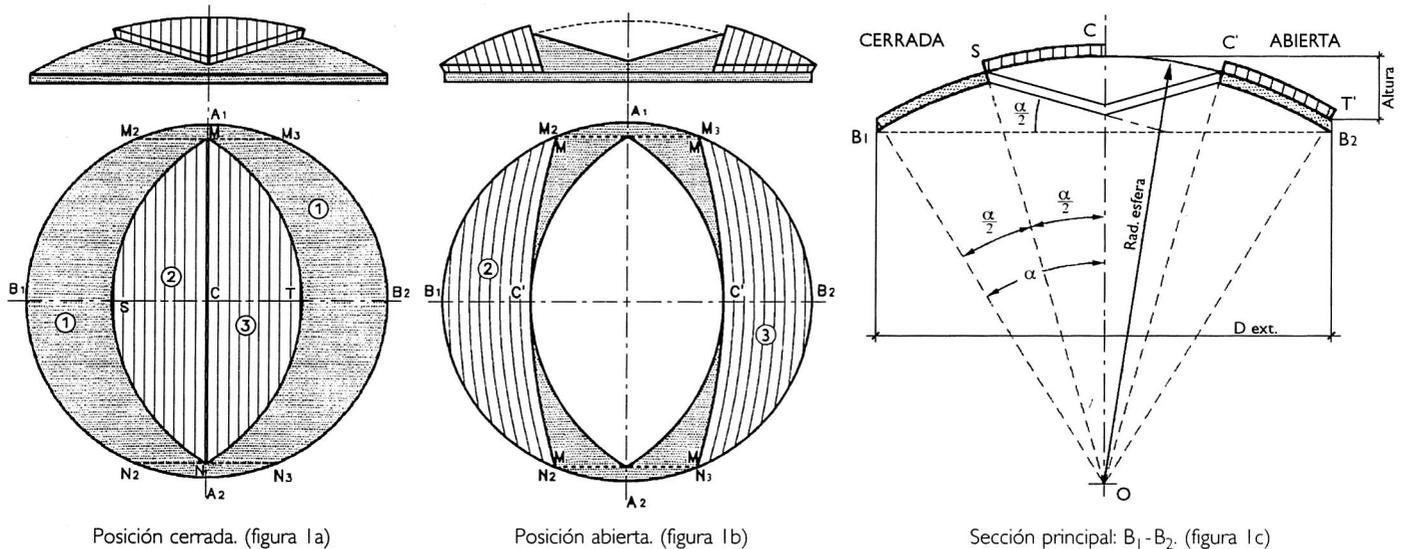
Los recintos de gran aforo, sobre los que se han materializado cubiertas retráctiles, o proyectos de las mismas, disponen normalmente de una planta sensiblemente circular. La mayor parte de las soluciones aplicadas e ideas propuestas presentan sistemas de apertura basados en el movimiento de rotación de alguna o algunas partes de la cubierta al rededor de un eje vertical, real o imaginario. En la fase de proyecto de la obra referida se barajaron diversas soluciones. Después de un análisis comparativo de todas ellas se optó por un sistema de apertura cuya característica más representativa la constituye una descomposición de la cubierta en elementos fijos y móviles, de tal modo que estos segundos describen movimientos de rotación al rededor de un eje imaginario horizontal.

En su redacción final, el proyecto complementa el uso originalmente planteado, constituyendo realmente un gran coliseo cubierto apto para la celebración de actividades culturales y deportivas muy diversas, pero que mediante la apertura de la cubierta se convierte en una plaza de toros.

## PRINCIPIO DEL SISTEMA DE APERTURA

### Condicionamientos geométricos

El sistema constructivo que se expone a continuación parte de una serie de premisas encaminadas a conseguir unas características funcionales determinadas minimizando en



lo posible el coste de la cubierta. A continuación se citan las más significativas:

- La superficie descubierta por la abertura debe ser de dimensiones importantes en relación con la de la cubierta completa; no menos de un tercio o un cuarto de aquella.
- La abertura debe quedar sensiblemente centrada en el conjunto y su forma debe presentar un cierto grado de simetría.
- En situación de cubierta abierta los elementos móviles que cierran la abertura deberán escamotearse sobre la parte permanente de la cubierta, de modo que no produzcan la ocupación de superficies o volúmenes adicionales.
- El número de elementos móviles deberá ser reducido con el fin de minimizar el número de mecanismos.
- Tratándose de una cubierta de planta sensiblemente circular, la disposición estructural de la misma debe adecuarse a las grandes dimensiones requeridas. En este sentido son favorables las tipologías en forma de cúpula o bóveda por cuanto permiten una economía estructural.
- Se evitará en lo posible que los elementos móviles desarrollen un trabajo estructural en voladizo, lo que penalizaría su coste.

### Características del sistema

A partir de las premisas precedentes se ha desarrollado un sistema de apertura basado en una determinada descom-

posición geométrica de la cubierta, que se combina con una adecuada concepción de trayectorias de sus elementos móviles.

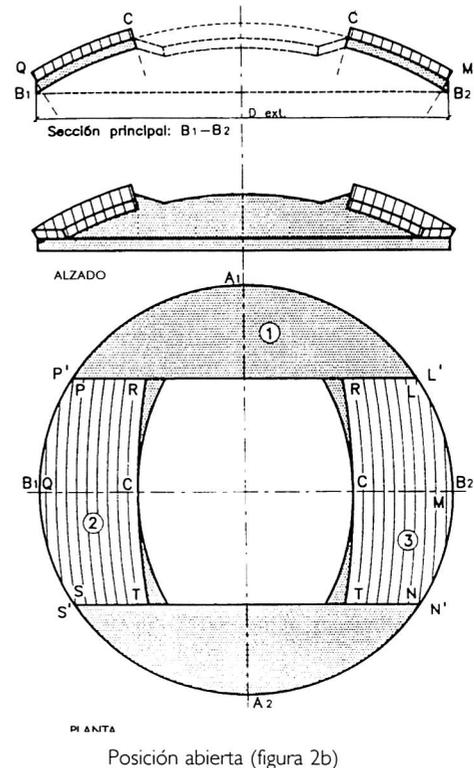
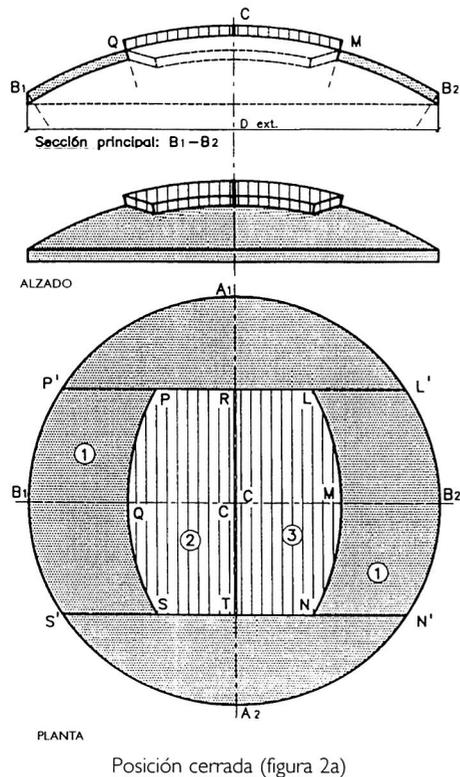
En primer lugar se exponen las características de la solución ideal, basada en el aprovechamiento superficial máximo del sistema. Posteriormente se expondrán soluciones más realistas.

**a.** La cubierta tiene forma de casquete esférico, en consecuencia, la parte principal de su estructura desarrolla un comportamiento predominantemente membranal. El conjunto se apoya únicamente en su contorno exterior a través de un anillo de tracción que recoge los esfuerzos radiales de la membrana. Esta disposición evita la transmisión de esfuerzos horizontales significativos a la sustentación.

**b.** La cubierta se descompone básicamente en dos partes:

**Parte fija o anillo**, que constituye la parte inmóvil situada en el exterior. Tiene una planta sensiblemente anular y deja en su interior una gran abertura en forma de huso (figura 1).

**Parte móvil o segmentos**, que se deslizan sobre el anillo con movimientos opuestos para producir la apertura y cierre de la cubierta (elementos 2 y 3 de la figura 1). Para conseguir un correcto deslizamiento y superposición de los elementos móviles sobre los fijos la superficie exterior del anillo y la interior de los segmentos son esféricas y



concéntricas. Sus radios se diferencian ligeramente para evitar interferencias entre los elementos físicos que determinan estas superficies.

c. La determinación de los contornos, interior del anillo y exteriores de los segmentos, viene dada por la condición de superposición máxima de las superficies en movimiento, condición exigible para conseguir la máxima abertura posible. Así, la línea exterior del segmento (M-T-N) constituye un arco circular en el espacio y elíptico en proyección horizontal, que en la posición de cubierta abierta debe coincidir con el arco  $M_3-B_2-N_3$  del círculo exterior de aquella (figura 1b). Correspondientemente el contorno interior del anillo coincidirá con el exterior de los segmentos en la posición de cubierta cerrada (figura 1a).

El desarrollo de los segmentos en el plano central de simetría S-C y C-T es igual al desarrollo de la misma línea diametral en la parte fija B<sub>1</sub>-S y T-B<sub>2</sub>. El semiángulo del cono que abarca el casquete esférico,  $\alpha$ , queda por tanto subdividido en 2 mitades dentro del plano principal del movimiento (figura 1c)

d. El desplazamiento de los segmentos, para pasar de la posición cerrada a la posición abierta, constituye un movimiento de rotación de ambos alrededor de un eje imaginario horizontal perpendicular al plano determinante del movimiento B<sub>1</sub>-C-B<sub>2</sub>. Este eje pasa por el centro de las esferas citadas (punto 0). Los puntos representativos

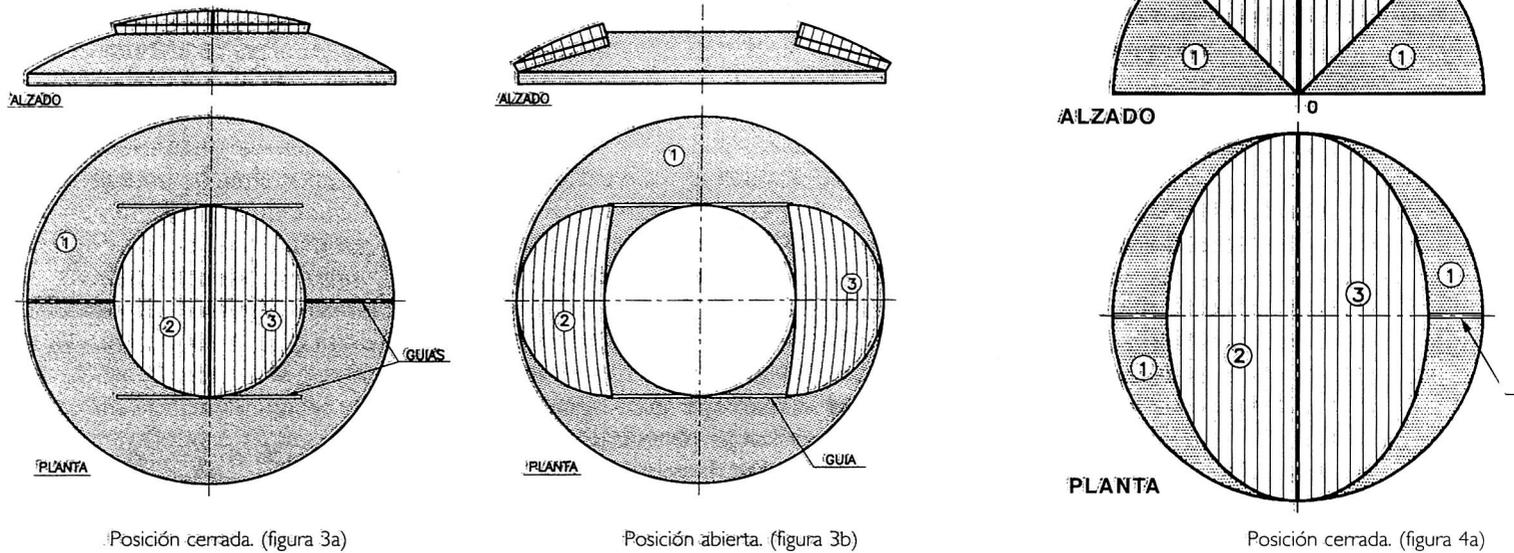
de los segmentos describen arcos de círculo que constituyen paralelos, por asimilación con los de la superficie de la tierra.

### Variantes geométricas

#### Variantes manteniendo el relieve del casquete

La solución expuesta en la figura 1 responde a la disposición de máxima abertura para un determinado casquete esférico. A nivel práctico resulta más interesante, para el mismo relieve de casquete, ir a soluciones del tipo indicado en la figura 2 en la que tanto los segmentos como el ovoide del anillo quedan truncados en los extremos de su eje mayor. Esta disposición implica una reducción en la superficie de la abertura, aunque en realidad la parte perdida es la menos útil por estar alejada del centro. Sin embargo, la reducción de la longitud de los segmentos tiene una repercusión estructural muy favorable. Por otra parte la existencia de unos laterales truncados por paralelos facilita otros aspectos relacionados con el guiado.

En general cualquier abertura que quede inscrita dentro de la geometría básica de la figura 1 puede constituir una solución. Otra variante que presenta cierto interés, es la que proporciona un anillo perfecto (figura 3). Los segmentos en este caso son semicirculares, si bien esta solución reduce el posible aprovechamiento de abertura útil.



Dependiendo del semiángulo  $\alpha$  el círculo abierto superará en mayor o menor proporción la mitad del diámetro de la cubierta.

#### Variantes modificando el relieve del casquete

Otro elemento que afecta sensiblemente a la superficie de apertura, dentro del mismo principio de funcionamiento, es la flecha de la cubierta ( $\beta$ ), expresada como relación altura-diámetro del casquete. Esta relación está totalmente ligada al semiángulo del cono principal,  $\alpha$ . En este sentido es interesante considerar dos casos límite. Uno sería el del casquete semiesférico (figura 4) en el cual el radio de la esfera es coincidente con el de la planta circular de la cubierta ( $\alpha = 90^\circ$ ). En este caso el eje de rotación puede ser real ya que los puntos extremos de los segmentos se encuentran en el eje de giro. La superposición de los segmentos sobre el anillo es total. La relación de apertura máxima llega al 71% de la planta de la cubierta. A pesar de todo, el gran desarrollo de superficies fijas y móviles, así como la desproporción entre la altura de la cubierta y su diámetro hacen poco práctica esta solución.

En la situación opuesta cabe considerar el caso de una cubierta plana; radio del casquete infinito (figura 5). En este caso el movimiento de los segmentos constituye un desplazamiento lineal dentro del propio plano. La relación de apertura máxima es del 39%, la menor en función de la altura. Este caso pudiera tener cierto interés para las cubiertas de dimensiones reducidas en las cuales el coste estructural tiende a ser menos significativo respecto del coste de los mecanismos. Parece claro que un despla-

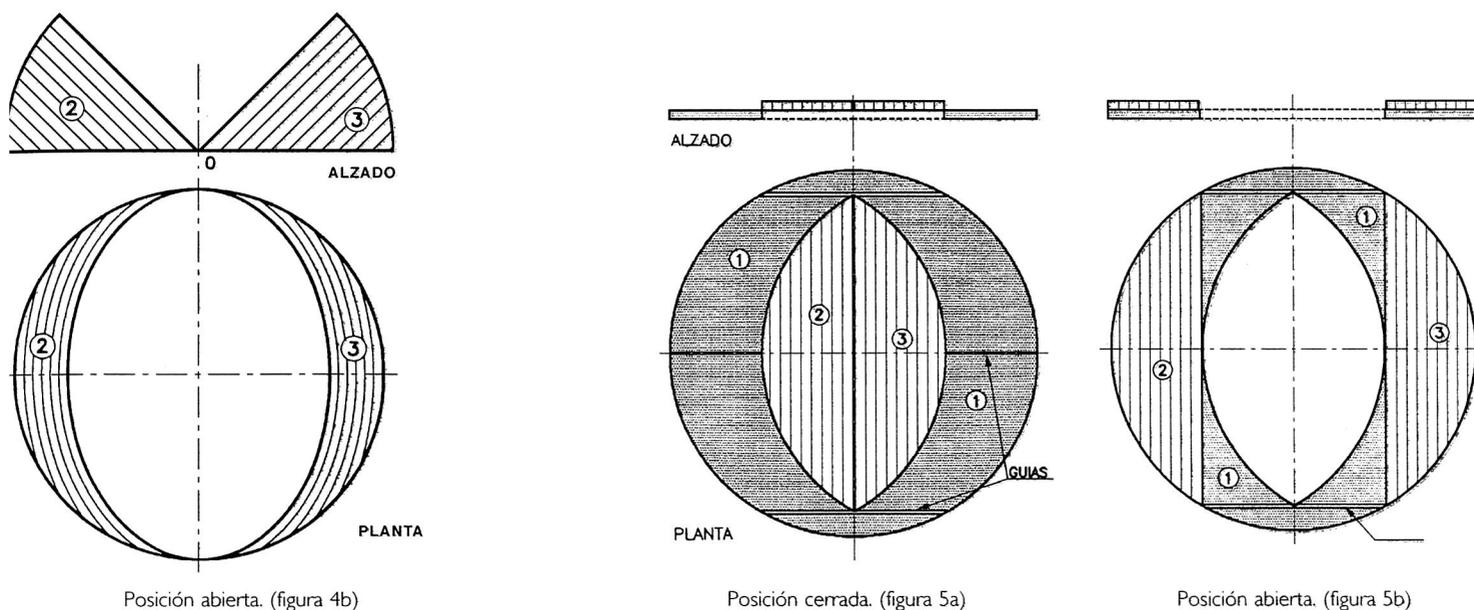
zamiento rectilíneo y horizontal puede implicar un menor coste de los sistemas que propician el movimiento; sin embargo una estructura de desarrollo plano provoca un comportamiento predominante de flexión que no resulta beneficiado por el efecto membranaral.

La elección de la flecha o relieve de la cubierta es, en consecuencia, un factor determinante del coste. La solución óptima en cada aplicación deberá constituir un equilibrio entre los aspectos funcionales y económicos.

#### MECANISMOS DE APERTURA Y CIERRE

Para transmitir los esfuerzos entre los segmentos y el anillo, así como para materializar el movimiento de aquellos, se precisa una serie de elementos intermedios que en el sistema expuesto se han concretado de la siguiente manera:

Cada uno de los segmentos móviles se sustenta en un determinado número de apoyos, mínimamente tres. En el caso de la solución más realista, (figura 2), dos de los apoyos se situarían en los laterales P-R y S-T. Dependiendo de las proporciones geométricas de los segmentos es posible ubicar otros dos apoyos en los mismos laterales o en el arco posterior (P-Q-S para el segmento 2). Cuanto mayor sea la proporción de los laterales respecto de la apertura, es decir más truncados se encuentran los segmentos, más se justificará el poner únicamente dos apoyos en cada lateral. Por el contrario, cuanto mayor sea el desarrollo longitudinal del segmento, menos truncado quede, será más conveniente situar únicamente un apoyo en cada lateral y los restantes, uno o varios, en el arco trasero.



Posición abierta. (figura 4b)

Posición cerrada. (figura 5a)

Posición abierta. (figura 5b)

El movimiento de los segmentos requiere un guiado, tanto vertical como horizontal, y un accionamiento. El guiado garantiza la estabilidad y transmisión de las cargas a lo largo del recorrido, y el accionamiento aporta la energía para moverlos.

En el sistema que se describe, el guiado se consigue a través de un conjunto de vigas-carril, existiendo una por cada punto de apoyo de los segmentos. Estas vigas tienen un desarrollo circular y se sitúan en paralelos correspondientes a los puntos de apoyo, quedando fijadas al anillo. El guiado vertical se desarrolla mediante los correspondientes trenes de rodadura, cuyo número de ruedas depende de las dimensiones y peso de los segmentos móviles. En cuanto al guiado lateral se consigue también mediante rodadura, disponiendo los ejes de los elementos rodantes en un plano sensiblemente perpendicular a la cubierta. Tanto la rodadura vertical como la horizontal, y particularmente ésta, pueden ser sustituidas por deslizaderas de bajo rozamiento.

En cuanto al accionamiento evidentemente admite múltiples soluciones, bien sea a través de mecanismos piñón-cremallera o cabestrantes, como a través de cilindros hidráulicos. En el caso que nos ocupa se hará referencia a sistemas piñón-cremallera por ser los proyectados en la aplicación concreta que se expone en este trabajo.

### CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

En cada proyecto concreto se establecen normalmente unos parámetros de partida, como son: diámetro exterior, superficie mínima de apertura, dimensión mínima de la

misma, velocidad de apertura y cierre, condiciones de aislamiento térmico y acústico, etc. El estudio de la solución concreta que cumpla estas condiciones con un coste mínimo requiere un análisis complejo, dado el elevado número de variables interrelacionadas.

Para simplificar el análisis cabe englobar el conjunto de los componentes del coste en ciertos grupos básicos:

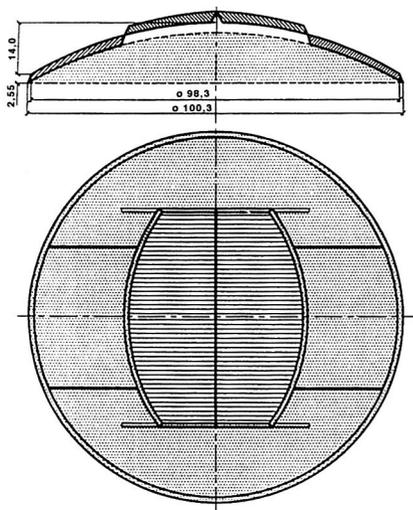
- Estructura
- Cerramientos
- Mecanismos

Por otro lado hay ciertas variables geométricas cuya incidencia es preponderante. Las dos más significativas son:

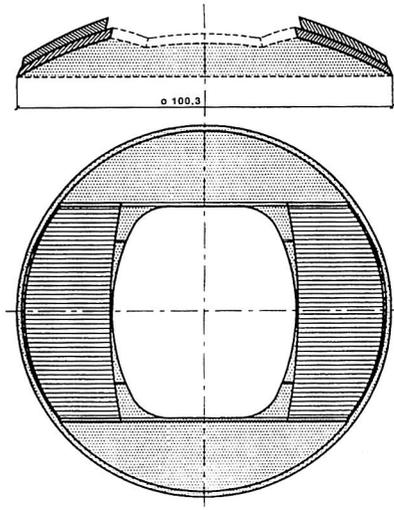
- a. La flecha de la cubierta ( $\beta$ ), determinada por la relación entre la altura y el diámetro del casquete
- b. Las proporciones de la abertura, expresadas mediante la fracción:  $\delta = \text{longitud}/\text{anchura}$  (en figura 2, longitud R-T, anchura Q-M)

Cualitativamente cabe hacer las siguientes consideraciones:

Desde el punto de vista estructural el aumentar la altura del casquete beneficia el comportamiento membranal reduciendo las solicitaciones pésimas. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor es el diámetro de la cubierta, el coste relativo de la estructura aumenta respecto del coste total de aquella. En consecuencia, desde esta perspectiva interesaría tender a aumentar la fracción  $\beta$ . No obstante esta tendencia no es indefinida; obviamente presenta un límite ya que si se aumenta desproporcionadamente la altura, el beneficio por reducir solicitaciones quedaría contrarrestado con el perjuicio por incremento de desarrollo estructural.



Cubierta posición cerrada. (figura 6a)



Cubierta posición abierta. (figura 6b)

Desde la perspectiva del cerramiento la tendencia es opuesta. Dado que el coste unitario del elemento de cierre es relativamente independiente de la forma, el aumentar la flecha implica un incremento de desarrollo superficial y en consecuencia un encarecimiento. En flechas bajas el incremento de desarrollo es pequeño, pero no así con flechas altas.

En lo que respecta a los mecanismos de accionamiento y guiado, el incrementar la flecha constituye evidentemente un encarecimiento. Una mayor flecha supone aumentar la fuerza ascensional para mover las masas de los segmentos, con la correspondiente repercusión en la potencia del mecanismo. Por otra parte, aunque en menor medida, el incremento de flecha provoca un mayor desarrollo de las guías, vigas-carril, etc. lo cual también afecta negativamente al coste.

La otra variable citada: proporciones de la abertura ( $\delta$ ), tiene también una incidencia importante. El truncado de los segmentos tiene una repercusión favorable en el coste de la estructura; beneficia a las partes móviles, porque reduce la luz libre en las fibras centrales, y también a la parte fija porque aproxima el comportamiento estructural al de un casquete anular. Por otra parte el reducir la relación longitud-anchura tiende a aumentar el desarrollo de los paralelos laterales. Puede incluso permitir la colocación de dos puntos de apoyo dentro de las mismas guías laterales lo que facilitaría la eliminación de las guías secundarias. Todo ello tiende a abaratar el mecanismo de accionamiento. Ahora bien, tampoco conviene reducir excesivamente la citada fracción ya que disminuye la superficie útil de la abertura quitando funcionalidad a la cubierta. Parece lógico imponer, como mínimo, una proporción tal que nunca sea menor la longitud de la abertura que la anchura de la misma (en la figura 2  $RT > QM$ ).

## CENTRO DE ACTIVIDADES DIVERSAS EN SAN SEBASTIÁN

### Bases de partida

Para la construcción de este edificio se desarrolló un proyecto que permitía bastante libertad en la elección de los parámetros de la cubierta. Los condicionamientos básicos fueron:

- Diámetro exterior: 100,3 m en la circunferencia de apoyo
- Abertura central: en su dimensión mínima no inferior al ruedo taurino (50 m).

### Solución geométrica adoptada

Como esquema de base se utilizó el de los segmentos truncados, similar al de la figura 2. Tras analizar diversas alternativas se determinaron las dos variables fundamentales.

Relación altura/diámetro del casquete esférico:  $\beta = 1/7$

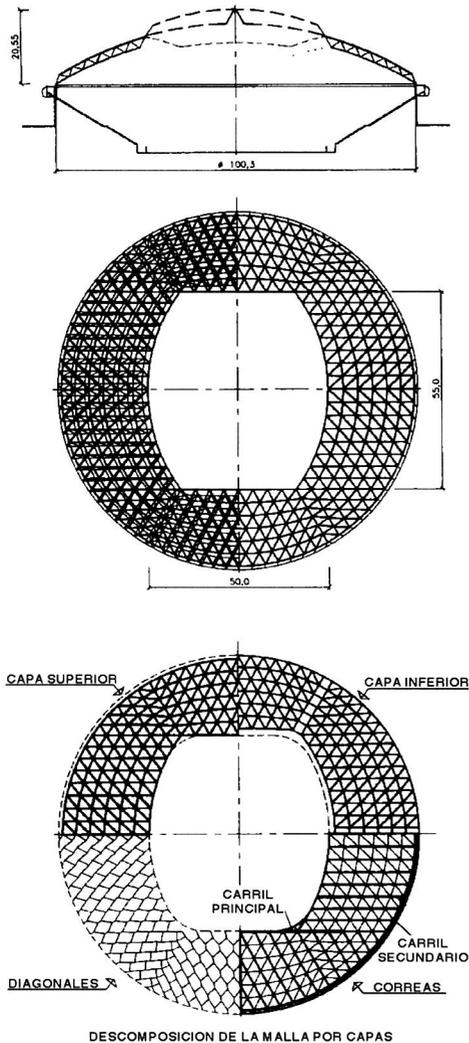
Relación longitud/anchura de la abertura:  $\delta = 1,1$

Como diámetro de referencia del casquete esférico se tomó el de la capa superior del anillo (98,3 m)

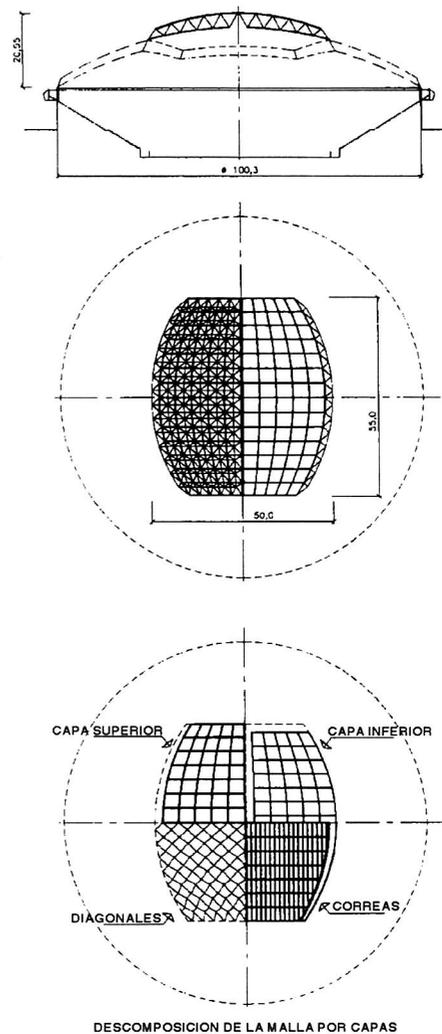
En el contorno interior del anillo se redondearon las esquinas consiguiendo una figura más armónica. El esquema general de la cubierta es el representado en la figura 6.

### Solución estructural

Tanto la estructura del anillo como las de los segmentos se han proyectado mediante estructura espacial. A excepción del contorno exterior, que es circular, los restantes presentan una geometría de notable irregularidad. Otro condicionante constituía la colocación de las vigas-carril que



Estructura del anillo fijo



Estructura de los segmentos móviles

imponían unas alineaciones de fuerte rigidez en la situación de los correspondientes paralelos. La estructura espacial permitía resolver satisfactoriamente las exigencias precedentes, facilitando incluso una retícula armónica con la estética del conjunto. La solución adoptada se representa en las figuras 7, 8 y 9.

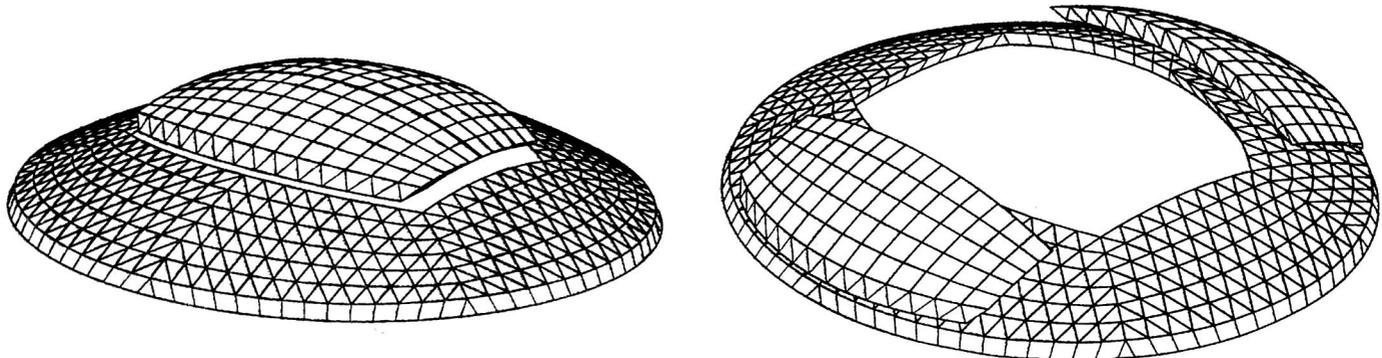
La retícula del anillo es de tipo triangular, sin embargo la de los segmentos tiene una disposición cuadrangular. Para homogeneizar en lo posible el reparto de cargas entre ambas y para conseguir una ligereza satisfactoria en los segmentos, éstos se sustentan en cuatro puntos de apoyo, dos en los laterales y otros dos en el contorno trasero. Esto obliga a la colocación de cuatro vigas carril por cada segmento. El supuesto encarecimiento producido por la existencia de cuatro vigas-carril queda compensado con creces al conseguir una estructura portante más ligera y económica.

Tras analizar la estructura se observa que la parte fija tiene efectivamente un comportamiento membranar bastante similar al de una cúpula.

En su contorno interior se producen fuertes compresiones, del orden de 180 t, mientras que en el exterior se genera una tracción muy regular, del orden de 230 t, canalizada a través de un anillo proyectado expresamente para ello.

### Mecanismo de apertura

El accionamiento de los segmentos se realiza mediante dos grupos motorreductores, que actúan sobre los correspondientes sistemas piñón-cremallera. Los grupos tractores se sitúan en los segmentos, desplazándose con estos, mientras que las cremallera se sitúan sobre las vigas-carril correspondientes.



Perspectiva

El guiado lateral se lleva a cabo mediante un sistema rodante sensiblemente horizontal que se apoya también en las vigas-carril laterales. En cuanto al guiado vertical y transmisión de cargas gravitatorias se realiza por rodadura sobre las cuatro vigas carril, dos laterales (principales) y dos traseras (secundarias).

El movimiento de cierre de los segmentos obliga a aplicar unas fuerzas ascensionales de empuje que evidentemente implican una aportación de energía no uniforme a lo largo del recorrido. Dado que el tiempo exigido para el cierre o apertura es del orden de 10 minutos, la potencia de los equipos tractores (4 unidades) no resulta excesiva, 8 Kw por cada equipo.

Todo el sistema de accionamiento está dotado de los correspondientes subsistemas de sincronización, automatismo, protección y control. Incluye también el control de los agentes externos limitadores del movimiento como son la nieve y el viento.

### Cerramiento

Con el fin de conseguir un adecuado acondicionamiento térmico, compatible con una iluminación natural suficiente, se han combinado dos sistemas de cierre:

El cierre del anillo fijo lo constituye un Sandwich, tipo Deck ligero, compuesto por un soporte en chapa de acero grecada, un aislamiento térmico con barrera de vapor, y una impermeabilización a base de lámina soldada de PVC. Entre el cierre y la malla espacial se sitúa además un techo acústico que contribuye a mejorar la sonoridad del recinto.

En cuanto a los segmentos, se cubrirán con una modalidad de policarbonato multicelular cuyo alto poder filtrante elimina la acción directa del sol y reduce el efecto invernadero.

### CONCLUSIÓN

Muchos de los sistemas empleados hasta la actualidad para la construcción y montaje de cubiertas retráctiles se basan en la descomposición de la cubierta en una serie de sectores que se desplazan y superponen mediante un movimiento giratorio de los mismos alrededor de un eje vertical.

Por el contrario, el sistema que aquí se expone presenta la particularidad de que el desplazamiento de los elementos móviles constituye un giro alrededor de un eje horizontal, lo que obliga a levantar y bajar masas importantes. Este aparente inconveniente queda sin embargo ampliamente compensado por el beneficio económico que proporciona el sistema al conseguir una estructura cuyo comportamiento es mucho más racional.

Dada su concepción estructural, el sistema presenta la ventaja adicional de que la cubierta prácticamente sólo transmite esfuerzos verticales a los soportes del contorno, lo cual favorece la economía de la estructura que ha de sustentarlo. Especialmente por este motivo resulta muy adecuado para ser aplicado sobre las plazas de toros ya construidas, aprovechando la sustentación del graderío o creando una estructura adicional, relativamente sencilla, adosada a la existente.