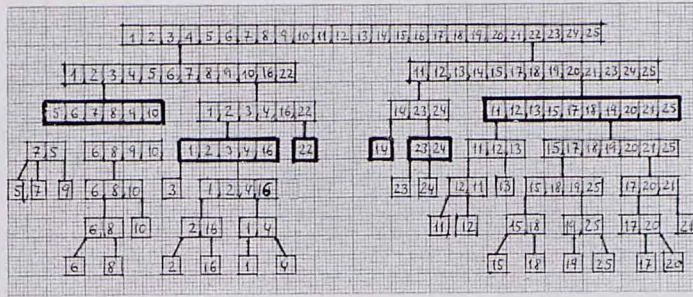




bles aquella cuya característica sea la de que la información perdida por el sistema al transformarse en un conjunto de subsistemas sea mínimo. La expresión de la información perdida es compleja y depende del número de lazos cortados y de la relación entre el número de elementos que posee cada subsistema. No es una función continua y la búsqueda de su valor mínimo no puede hacerse más que combinatoriamente, a través de un ordenador. En el caso que nos ocupa, las particiones óptimas resultan ser:



El nivel de partición escogido, en función de la información perdida y de la mínima complejidad deseada, ha sido:

Solicitud funcional n.º 1 (SF1) =	necesidades 5, 6, 7, 8, 9, 10
» 2 (SF2) =	» 22
» 3 (SF3) =	» 1, 2, 3, 4, 16
» 4 (SF4) =	» 23, 24
» 5 (SF5) =	» 14
» 6 (SF6) =	» 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 25

El método al que se hace referencia pasa, seguidamente, a estudiar, por separado, cada una de las solicitudes funcionales o subsistemas de necesidades. Se asigna a cada necesidad de la solicitud funcional tratada la serie de soluciones formales que pueden satisfacerla. A continuación se relaciona cada solución formal con todas las restantes, excepto con las pertenecientes a su misma necesidad. Esta relación se matiza desde el valor cero (indiferencia en la adopción simultánea o no de ambas soluciones) hasta el valor 1 (compatibilidad y necesidad de una con respecto a la otra). El valor -1 indica incompatibilidad entre las dos soluciones formales relacionadas. Las soluciones formales propuestas y sus relaciones, para las solicitudes funcionales halladas, han sido:

SF1 — Solicitud Funcional 1

N-5	N-6	N-7	N-8	N-9	N-10	Necesidades
SF1 (1)	SF1 (3)	SF1 (4)	SF1 (6)	SF1 (7)	SF1 (9)	
SF1 (2)		SF1 (5)		SF1 (8)	SF1 (10)	
					SF1 (11)	

- SF1 (1) = Longitud de las barras de las capas constante y comprendida entre 1 y 3,5 m. Longitud de las barras diagonales constante y comprendida entre 1 y 3,5 m.
- SF1 (2) = Longitud de las barras de las capas variable y comprendida entre 1 y 3,5 m. Longitud de las barras diagonales variable y comprendida entre 1 y 3,5 m.
- SF1 (3) = Descomposición del borde (zona de máximas tracciones) en el máximo número de anillos.
- SF1 (4) = Modulación constante, en tamaño y forma, sobre toda la cúpula.
- SF1 (5) = Modulación variable componiendo las zonas de transición de forma que los esfuerzos no experimentan en ellas cambios bruscos.

- SF1 (6) = Escoger la modulación de mayor tamaño posible, pero de forma que no se superen las 25 T. de tracción o compresión en las barras.
- SF1 (7) = Anillo de borde diferenciado de la malla.
- SF1 (8) = Anillo de borde involucrado en la malla.
- SF1 (9) = Superficie esférica sin elementos de rigidización.
- SF1 (10) = Superficie esférica con elementos de rigidización en malla espacial según paralelos.
- SF1 (11) = Superficie esférica con elementos de rigidización en malla espacial según meridianos.

SF1 (3)	SF1 (4)	SF1 (5)	SF1 (6)	SF1 (7)	SF1 (8)	SF1 (9)	SF1 (10)	SF1 (11)	
	+1	(-)	+1		+1	+1	+0.1	+0.1	SF1 (1)
	(-)	+0.9	+0.1		+1	+1	+0.9	+0.9	SF1 (2)
			+1	(-)	+1	+1	+1		SF1 (3)
			+0.5			+0.9	+0.5	+0.5	SF1 (4)
			+0.1		+1	+0.5	+0.9	+0.9	SF1 (5)
					+1	+0.9	+0.5	+0.5	SF1 (6)
					(-)	(-)	(-)		SF1 (7)
					+1	+0.1			SF1 (8)

SF2 — Solicitud Funcional 2

N22 → Necesidad  
SF2 (1) — Definición geométrica de la cúpula por anillos paralelos.

SF3 — Solicitud Funcional 3

N1	N2	N3	N4	N16	Necesidades
SF3 (1)	SF3 (5)	SF3 (7)	SF3 (10)	SF3 (12)	
SF3 (2)	SF3 (6)	SF3 (8)	SF3 (11)		
SF3 (3)		SF3 (9)			
SF3 (4)					

- SF3 (1) = Triangulación equilátera en planta proyectada sobre la cúpula.
- SF3 (2) = Triangulación a partir del icosaedro.
- SF3 (3) = Triangulación por anillos.
- SF3 (4) = Cuadrangulación de la esfera, con diagonalización de los cuadrados.
- SF3 (5) = Un único tipo de nudo muy resistente.
- SF3 (6) = Tipología de nudos adecuada a los esfuerzos, en función del stock existente.
- SF3 (7) = Todas las barras iguales en longitud y sección.
- SF3 (8) = Grandes lotes de barras iguales en longitud, pero distintas entre lotes. Barras adecuadas a la resistencia y a la geometría con distintivos claros de identificación.
- SF3 (9) = Barras adecuadas a la resistencia y a la geometría con distintivos claros de identificación.
- SF3 (10) = Un solo tipo de nudo.
- SF3 (11) = Nudos adecuados a la resistencia necesaria con distintivos claros de identificación.
- SF3 (12) = Fácil acceso a nudos y barras durante el montaje.

SF3 (5)	SF3 (6)	SF3 (7)	SF3 (8)	SF3 (9)	SF3 (10)	SF3 (11)	SF3 (12)	
+0.5	+0.9	+0.1	+0.1	+0.9	+0.5	+0.9	+0.5	SF3 (1)
+0.5	+0.9	+0.1	+0.1	+0.9	+0.5	+0.9	+0.1	SF3 (2)
+0.5	+0.9	(-)	+1	+0.9	+0.5	+0.9	+0.5	SF3 (3)
+0.5	+0.9	(-)	+0.5	+0.9	+0.5	+0.9	+0.1	SF3 (4)
		+0.9	+0.1	+0.1	+1	(-)		SF3 (5)
		+0.1	+0.5	+0.9	(-)	+1		SF3 (6)
					+0.9	+0.1		SF3 (7)
					+0.1	+0.5		SF3 (8)
					+0.1	+0.9		SF3 (9)
								SF3 (10)
								SF3 (11)

SF4 — Solicitud Funcional 4

N23	N24 → Necesidades
SF4 (1)	SF4 (3)
SF4 (2)	
SF4 (1) =	Triangulación con barras no concurrentes en la zona clave.
SF4 (2) =	Clave formada por barras concurrentes.
SF4 (3) =	Simetría de la malla respecto cualquier plano meridiano.
SF4 (3)	
+ 0.1	SF4 (1)
+ 1	SF4 (2)

SF5 — Solicitud Funcional 5

N14 → Necesidad	
SF5 (1) =	Posibilidad de pruebas de carga parciales a poca distancia del suelo.

SF6 — Solicitud Funcional 6

N11	N12	N13	N15	N17	
SF6 (1)	SF6 (3)	SF6 (4)	SF6 (5)	SF6 (7)	
SF6 (2)			SF6 (6)	SF6 (8)	
				SF6 (9)	
N18	N19	N20	N21	N25	Necesidades
SF6 (10)	SF6 (13)	SF6 (16)	SF6 (18)	SF6 (20)	
SF6 (11)	SF6 (14)	SF6 (17)	SF6 (19)		
SF6 (12)	SF6 (15)				
SF6 (1) =	Canto y modulación constante en la malla.				
SF6 (2) =	Canto y modulación variable en la malla.				
SF6 (3) =	Superficie esférica sin elementos rigidizadores relevantes.				
SF6 (4) =	Uniformidad de trabajo en barras y nudos situados a la misma altura y continuidad de trabajo en barras y nudos adyacentes del mismo meridiano.				
SF6 (5) =	Montaje por zonas en el suelo y posterior elevación.				
SF6 (6) =	Montaje in situ mediante secuencia autorresistente.				
SF6 (7) =	Sobredimensionado de la malla.				
SF6 (8) =	Montaje por anillos autorresistentes.				
SF6 (9) =	Montaje por sectores meridianos autorresistentes.				
SF6 (10) =	Gran número de apoyos de montaje.				
SF6 (11) =	Montaje por proceso autorresistente de forma que la zona construida tenga siempre gran rigidez.				
SF6 (12) =	Montaje por zonas no necesariamente autorresistentes pero que requieran un mínimo número de apoyos.				
SF6 (13) =	Montaje en el suelo de toda la cúpula y elevación posterior.				
SF6 (14) =	Montaje en el suelo de la cúpula en varias fases.				
SF6 (15) =	Gran número de montadores.				
SF6 (16) =	Prescindir de grúas.				
SF6 (17) =	Montaje por partes e nel suelo y posterior elevación.				

SF6 (18) = Sobredimensionado de la malla.  
 SF6 (19) = Definición de zonas óptimas a elevar con la fijación de los correspondientes puntos de enganche.

SF6 (20) = Montaje en el suelo y posterior elevación.

SF6 (3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	
+0.9	+0.5	+0.9	+0.9	+0.5	+0.1	+0.1		+0.5	+0.5		+0.5			+0.5	+0.5	+0.5	SF6 (1)	
+0.9	+0.9	+0.5	+0.5	+0.5	+1	+0.1		+0.1	+0.5		+0.9			+0.1	+0.1	+0.9	SF6 (2)	
+0.9	+0.5	+0.1					+0.5	+0.1	+0.5				+0.1	+0.5	+0.5		SF6 (3)	
																	SF6 (4)	
				+0.5	+0.9	+0.5	+0.1	+0.5	+0.5	+1	+0.9	+0.1	(-)	+1	+0.5	+0.9	+1	SF6 (5)
				+0.1	+0.9	+0.1	+0.5	+0.5	+0.1	(-)	+0.1	+1	+1	(-)	+0.1	(-)	(-)	SF6 (6)
				+0.1	+0.1	+0.1	+0.9	+0.5	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+1	+0.9	+0.5			SF6 (7)
				+0.5	+0.5	+0.5	(-)	+0.9	+0.9	+0.9	+0.9	+0.1	+0.9	+0.5				SF6 (8)
				+0.5	+0.5	+0.1	(-)	+0.5	+0.9	+0.5	+0.9	+0.1	+0.9	+0.5				SF6 (9)
				(-)	+0.5	+0.5	+1	+0.5	+0.1	+0.5	+0.5	+0.5						SF6 (10)
				+0.1	+0.5	+0.5	+0.1	+0.9	+0.1	+0.5	+0.9	+0.9						SF6 (11)
				+0.1	+0.9	+0.5	+0.9	+1	+0.1	+0.9	+1							SF6 (12)
				(-)	(-)	+0.9	+0.5	+0.9										SF6 (13)
				(-)	+1	+0.5	+0.9	+0.9										SF6 (14)
				+0.9	+0.5													SF6 (15)
				+0.9	(-)	(-)												SF6 (16)
				+0.5	+0.9	+0.9												SF6 (17)
																		SF6 (18)
																		SF6 (19)

En cada solicitud funcional se ordenan las cinco mejores preformas, entendiendo por preforma el conjunto formado por una solución formal de cada necesidad. La clasificación de las preformas se hace mediante ordenador en base al criterio de minimizar la función  $\sum (I_{ij} - J)^2$  siendo  $I_{ij}$  el lazo entre las soluciones formales  $i, j$  y  $J$  el valor:

$$J = \frac{\text{lazos cortados por la solicitud funcional considerada}}{\text{lazos existentes en la solicitud funcional considerada}}$$

El sumatorio tendrá, naturalmente, tantos términos como necesidades la solicitud funcional.

Los resultados obtenidos han dado en todos los casos idéntico valor a varias preformas. Así en la solicitud funcional SF6 resultan ser óptimas las cuatro preformas definidas por las soluciones formales SF6 (i) siguientes:

- $i = 2, 3, 4, 5, 8, 12, 14, 17, 19, 20$
- $i = 1, 3, 4, 5, 8, 12, 14, 17, 19, 20$
- $i = 1, 3, 4, 5, 8, 11, 14, 17, 19, 20$
- $i = 2, 3, 4, 5, 8, 11, 14, 17, 19, 20$

Las cuatro tienen en común las soluciones formales 3, 4, 5, 8, 14, 17, 19, 20 que satisfacen a las necesidades N12, N13, N15, N17, N19, N20, N21 y N25 respectivamente, y que, por tanto, se aceptan. Entre las restantes se aceptaron la SF6 (2) para la necesidad N11 y la SF6 (12) para la necesidad N18.

Las preformas resultantes para las restantes solicitudes funcionales han sido:

- SF1: SF1(2), SF(3), SF1(5), SF1(6), SF1(8), SF1(9).
- SF2: SF2(1).
- SF3: SF3(3), SF3(6), SF3(9), SF3(11), SF3(12).
- SF4: SF4(2), SF4(3).
- SF5: SF5(1).

La preforma resultante ha podido, pues, describirse de la siguiente manera:

CUPULA TRIANGULAR POR ANILLOS SEGUN PARALELOS, CON UNA TIPOLOGIA DE NUDOS Y BARRAS ADECUADA A LA RESISTENCIA Y A LA GEOMETRIA, EN FUNCION DEL «STOCK» EXISTENTE, CON DISTINTIVOS CLAROS DE IDENTIFICACION QUE EVITEN POSIBLES CONFUSIONES. LA MALLA SERA DE CANTO Y MODULACION VARIABLES Y DEFINIRIA UNA SUPERFICIE ESFERICA SIN ELEMENTOS RIGIDIZADORES RELEVANTES, CON BARRAS DE LONGITUD COMPREDIDA ENTRE 1 Y 3,5 m. SIN SUPERAR LAS 25 TONELADAS DE ESFUERZO AXIL.

DEBERA EXISTIR UNIFORMIDAD DE TRABAJO EN BARRAS Y NUDOS SITUADOS A UNA MISMA ALTURA, ASI COMO CONTINUIDAD EN EL COMPORTAMIENTO DE BARRAS Y NUDOS AD-

YACENTES PERTENECIENTES A UN MISMO MERIDIANO. LA MALLA SERA SIMETRICA RESPECTO A CUALQUIER PLANO MERIDIANO Y LA CLAVE ESTARA FORMADA POR BARRAS CONCURRENTES. EL BORDE, ZONA DE MAXIMAS TRACCIONES, SE DESCOMONDRA EN EL MAYOR NUMERO POSIBLE DE ANILLOS, QUEDANDO TODOS ELLOS INVOLUCRADOS EN LA MALLA.

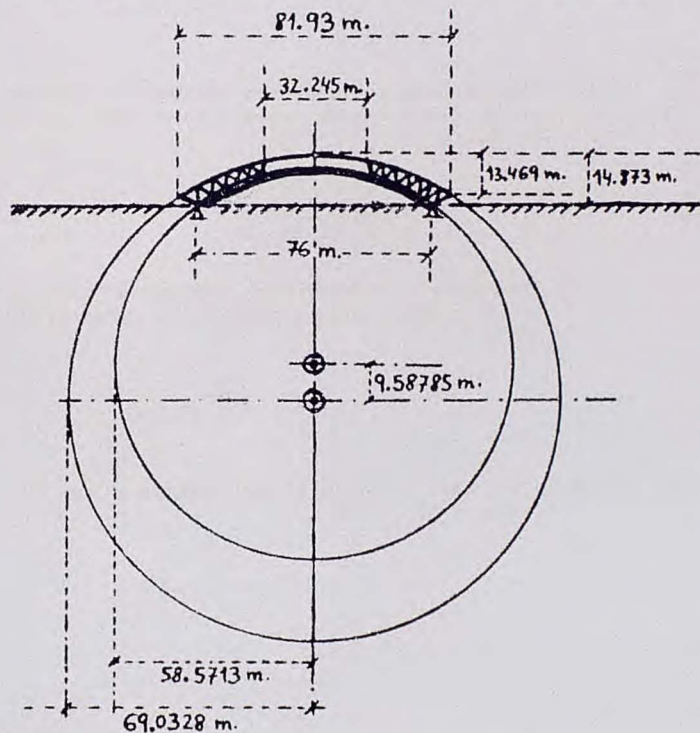
LA CONSTRUCCION SE REALIZARA POR ANILLOS EN EL SUELO ELEVANDOSE POSTERIORMENTE POR ZONAS NO NECESARIAMENTE AUTORRESISTENTES, PERO QUE REQUIERAN UN MINIMO NUMERO DE APOYOS, ZONAS EN LAS QUE SE TENDRAN QUE DEFINIR LOS CORRESPONDIENTES PUNTOS DE ENGANCHE DE LAS GRUAS. ANTES DE LA ELEVACION SE REALIZARAN PRUEBAS DE CARGA PARCIALES.

## 2. ESTRUCTURA PROYECTADA Y REALIZADA

### 2.1. Definición geométrica

La cúpula apoya sobre 36 pilares de hormigón que a su vez soportan, también, la estructura circundante, equidistantes y dispuestos en una circunferencia de 76 m. de diámetro. La distancia entre ejes de pilares, medida sobre el arco de circunferencia, es, pues, de 6,632 m.

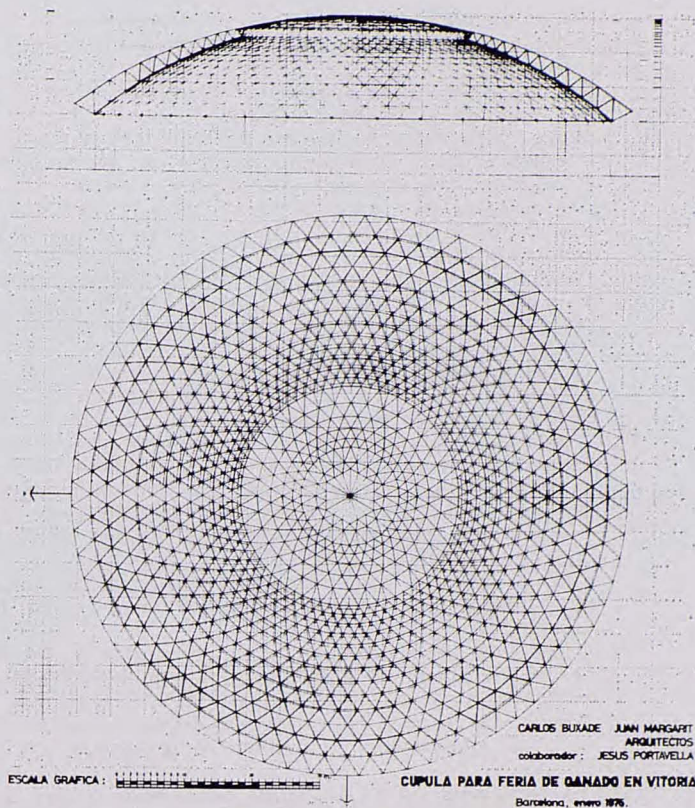
La cúpula viene definida desde su arranque en los pilares por una malla tetraédrica de dos capas, perteneciendo los nudos de apoyo a la capa interior (intradós). El canto de esta malla es variable, disminuyendo a medida que se acerca a la clave. Los nudos de las capas interior y exterior definen así dos superficies esféricas de radios 58,5713 m. y 69,0328 m. respectivamente, y cuya distancia entre centros es de 9,58785 m.



La capa interior se suprime en la zona de la clave donde se define una malla de una sola capa cuyo diámetro en planta es de 32,2452 m. La altura libre desde el plano horizontal de los apoyos hasta la clave es de 14,873 m. La capa exterior cubre, pues, una superficie circular en planta de 81,93 m. de diámetro y el área del casquete esférico que define es de 5842,2 m<sup>2</sup>.

El plano número 1 representa, en planta, sin las barras diagonales que unen la capa exterior con la interior, la triangulación adoptada, cuyas características son:

1.ª Los nudos de la capa exterior definen 20 círculos paralelos,



un hexágono y un nudo poligonal especial en la clave.

- 2.ª Los nudos de la capa interior definen 13 círculos paralelos.
- 3.ª Los triángulos que se definen en ambas capas van disminuyendo hacia la clave hasta el círculo paralelo que separa la malla de doble capa de la malla de una sola capa. En este paralelo se parte de nuevo de un triángulo mayor que vuelve a disminuir hasta el segundo paralelo anterior al hexágono superior. Partiendo de esta definición pudieron determinarse las coordenadas de los 2.161 nudos, que se reducen, por simetría, a 122 casos.

### 2.2. Cálculo

Obtenido, pues, el modelo geométrico de la cúpula y a partir de un estado de cargas definido por:

Sobrecarga de nieve: 60 kg/m<sup>2</sup>

Sobrecarga de viento: 15 kg/m<sup>2</sup> (actuando toda ella presionando la cúpula, succionándola, o presionando en una zona de la base y succionando en la clave y en la zona opuesta de la base).

Con cargas y sobrecargas de uso: 45 kg/m<sup>2</sup>.

Temperatura: variaciones bruscas de  $\pm 20^{\circ}$  C.

Se procede al análisis de la misma a partir de las hipótesis de la teoría de la elasticidad y suponiendo las cargas actuantes en los nudos, hipótesis esta última que se realiza plenamente, ya que la plementería apoya sobre correas que se conectan a la estructura resistente tan sólo a través de los nudos.

Dos han sido los métodos de análisis empleados: el cálculo matricial por zonas, especialmente en las que la triangulación sufre cambios geométricos, y el método de asimilación. Sobre el primer método, suficientemente conocido, nada detallaremos aquí (1). En cuanto al método de asimilación (2) se resumen a continuación el proceso y sus características principales.

#### 2.2.1. Proceso general

El método se basa en la asimilación de la malla espacial a estructuras continuas, homogéneas e isotropas, a partir de cuyos

(1) Puede verse «Cálculo matricial de estructuras de barras». — Margarit-Buxadé, Ed. Blume 1969.

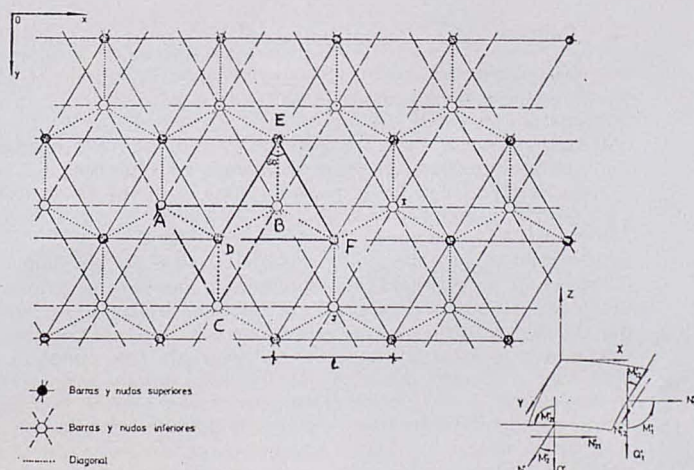
(2) Puede verse «Las mallas espaciales en la arquitectura». — Margarit-Buxadé, Ed. Gustavo Gili 1970.

esfuerzos se obtienen las tracciones y compresiones en las barras de la malla. El proceso de cálculo consta, pues, de los siguientes pasos:

- 1.º Determinación de las expresiones generales de los momentos flectores y torsores, esfuerzos axiales, esfuerzos cortantes y deformaciones en una lámina continua, homogénea e isotrópica cuyo plano medio coincide, en forma y dimensiones, con el plano medio de la malla espacial planteada. Los módulos de elasticidad longitudinal y transversal, el coeficiente de Poisson y el canto de esta lámina continua son incógnitas.
- 2.º Determinación, en función de las expresiones generales de esfuerzos hallados en el apartado anterior, de las expresiones generales de las tracciones y compresiones en las barras de la malla.
- 3.º Expresión general de las deformaciones que las tracciones y compresiones de las barras, determinadas en el apartado anterior, producen en la malla.
- 4.º Determinación, a partir de la expresión general de las deformaciones de la lámina continua, homogénea e isotrópica y de las deformaciones de la malla, del valor de los módulos de elasticidad lineal y transversal, coeficiente de Poisson y canto de la lámina, valores que se definían como incógnitas en el apartado 1.º
- 5.º Cálculo del valor numérico de los esfuerzos de la lámina, cuyas expresiones generales se han determinado en el apartado 1.º
- 6.º Cálculo del valor numérico de las tracciones y compresiones en las barras de la malla, cuyas expresiones generales se han determinado en el apartado 2.º
- 7.º Cálculo del valor numérico de las deformaciones en la lámina de asimilación y, por tanto, en la malla.

**2.2.2. Determinación en una malla tetraédrica, de las tracciones y compresiones en las zarras de la malla, en función de los esfuerzos en la estructura continua, homogénea isotrópica de asimilación**

Del estudio del elemento rectangular circunscrito a uno de los triángulos de las caras de la malla y suponiendo que los esfuerzos de lámina actúan en los nudos de la malla, se obtienen los valores que se indican a continuación.



**2.2.2.1. Tracciones y compresiones debidas al esfuerzo axial de lámina  $N'_1$  en la dirección del eje X**

$$P_{AB} = P_{DF} = \frac{N'_1}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot N'_1$$

**2.2.2.2. Tracciones y compresiones debidas a lesfuerzo axil de lámnia  $N'_2$ , en la dirección del eje Y**

$$P_{DF} = P_{AB} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot N'_2$$

$$P_{DE} = P_{EF} = P_{AC} = P_{BC} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot N'_2$$

**2.2.2.3. Tracciones y compresiones debidas a los esfuerzos cortantes  $N'_{12}$ , en el plano de la lámina**

$$P_{EF} = P_{AC} = P_{BC} = -P_{DE} = \frac{1}{2} \cdot N'_{12}$$

**2.2.2.4. Tracciones y compresiones debidas a los esfuerzos cortantes  $Q'_1$  perpendiculares a la superficie media de la lámina y aplicados en el lado paralelo al eje Y**

$$P_{BD} = -P_{BF} = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot \alpha}{2 \cdot \beta} \cdot Q'_1$$

**2.2.2.5. Tracciones y compresiones debidas a los esfuerzos cortantes  $Q'_2$  perpendiculares a la superficie media de la lámina y aplicados en el lado paralelo al eje X.**

$$P_{BE} = \frac{\alpha \cdot l}{\beta} \quad P_{BF} = P_{BD} = \frac{\alpha \cdot l}{2 \cdot \beta} \cdot Q'_2$$

**2.2.2.6. Tracciones y compresiones debidas al momento flector  $M'_1$  cuyo vector representativo tiene la dirección del eje X.**

$$P_{DF} = P_{AB} = \frac{3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \beta} \cdot M'_1$$

**2.2.2.7. Tracciones y compresiones debidas al momento flector  $M'_2$ , cuyo vector representativo tiene la dirección del eje X.**

$$P_{ED} = P_{EF} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \beta} \quad P_{DF} = -P_{AB} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \beta}$$

**2.2.2.8. Tracciones y compresiones debidas a los momentos tensores  $M'_{12}$ ,  $M'_{21}$ .**

$$P_{AC} = P_{BC} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \beta} \cdot M'_{12}$$

$$P_{FB} = -P_{DB} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot M'_{12}$$

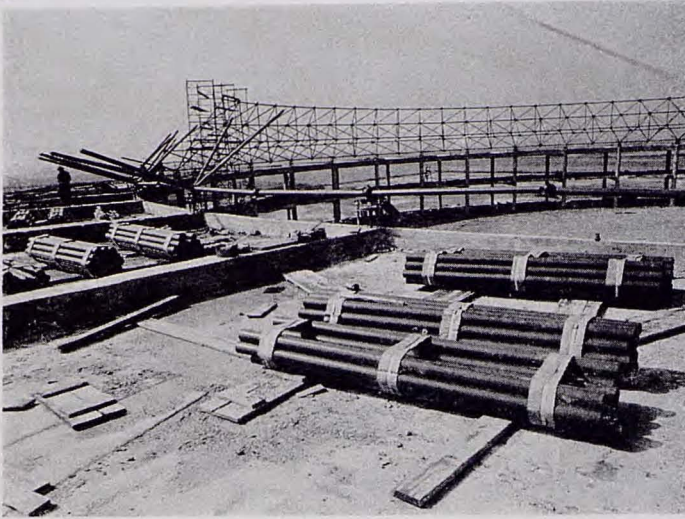
**2.2.3. Determinación de las características de la lámina ficticia de asimilación.**

**2.2.3.1. Deformaciones en la malla debidas a  $N'_1$  y a  $N'_2$ .**

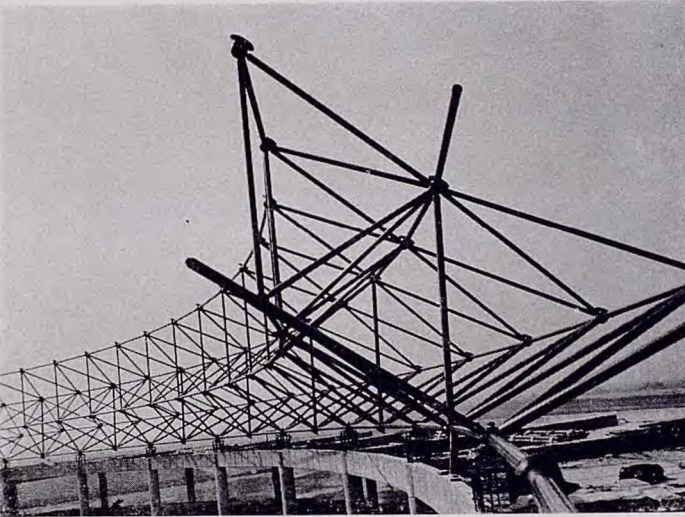
$$\epsilon_x = \frac{N'_1}{h' \cdot E'_x} \quad \epsilon_y = -\frac{v'_y \cdot N'_1}{h' \cdot E'_x}$$

$$\epsilon_x = \frac{N'_2}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot A \cdot E} \quad \epsilon_y = \frac{1 \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot A \cdot E} \cdot N'_2$$

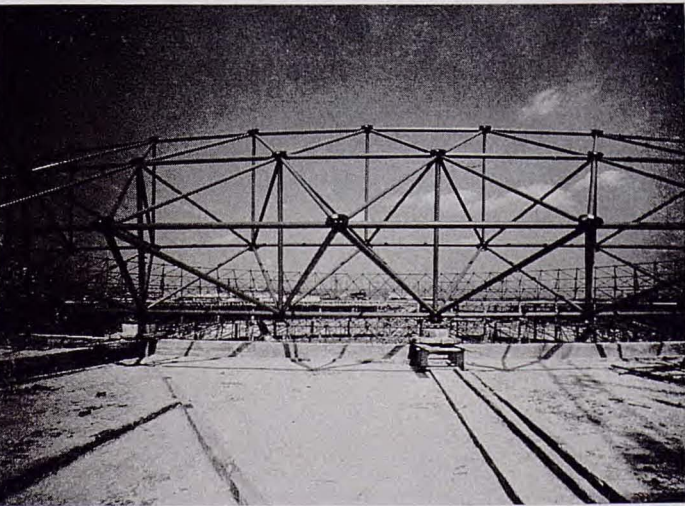
1.



2.



3.



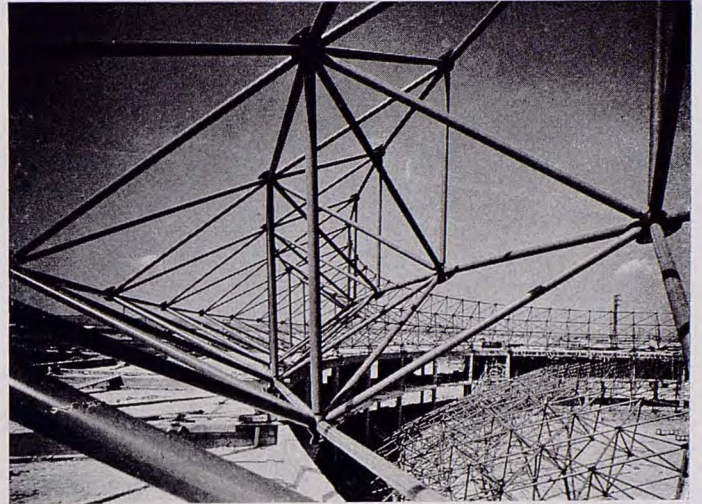
2.2.3.2. Deformaciones en la lámina ficticia debidas a  $N'_1$  y a  $N'_2$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma'_1}{E'_x} - \nu'_x \cdot \frac{\sigma'_2}{E'_x} \qquad \epsilon_y = \frac{\sigma'_2}{E'_y} - \nu'_y \cdot \frac{\sigma'_1}{E'_x}$$

2.2.3.3. Determinación del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson de la lámina ficticia.

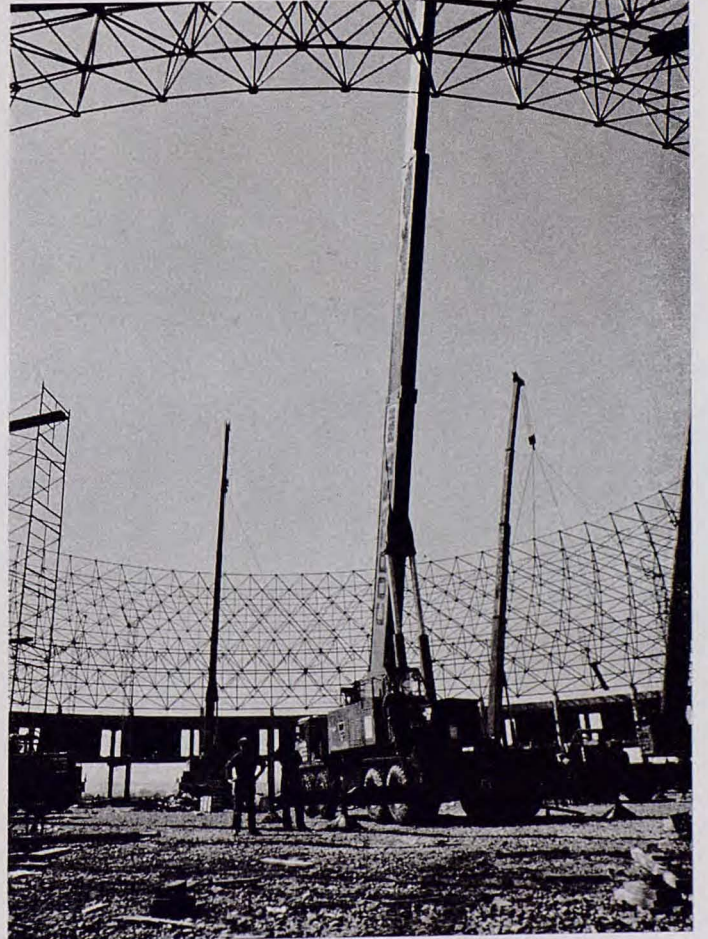
Igualando las expresiones de 3 · 1 y 3 · 2 se obtiene:

$$E'_x = E'_y = E' = \frac{4 A E}{\sqrt{3} \cdot l \cdot h'} \qquad \nu'_x = \nu'_y = \nu' = \frac{1}{3}$$



4.

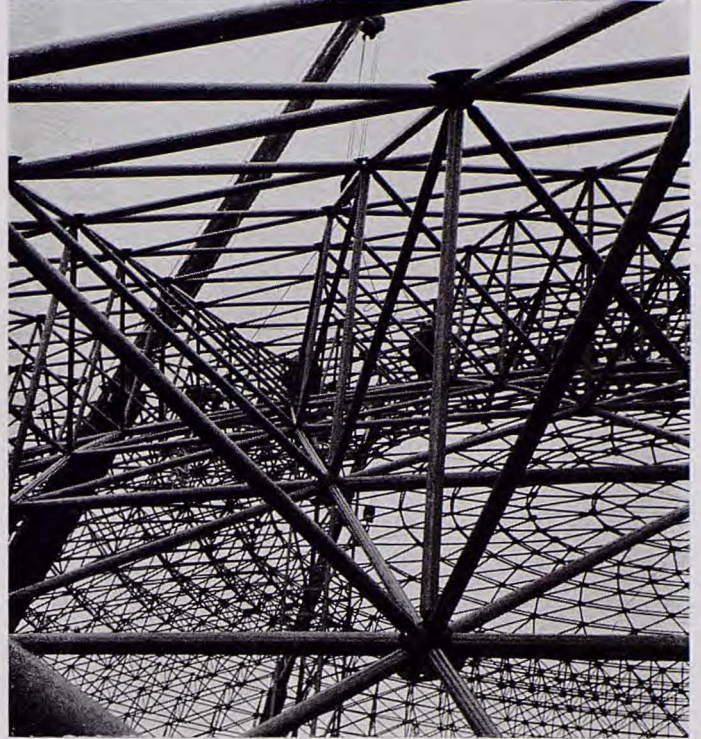
5.



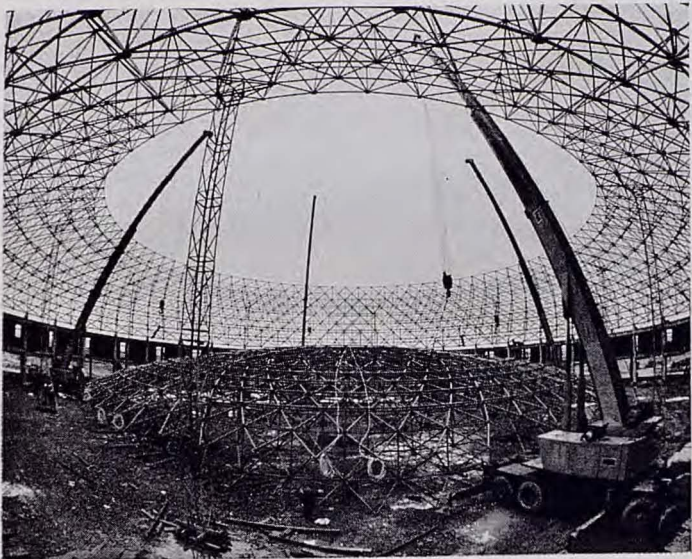
6.



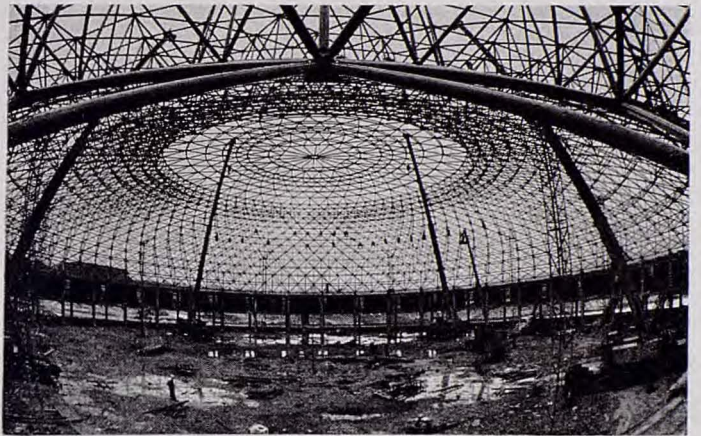
9.



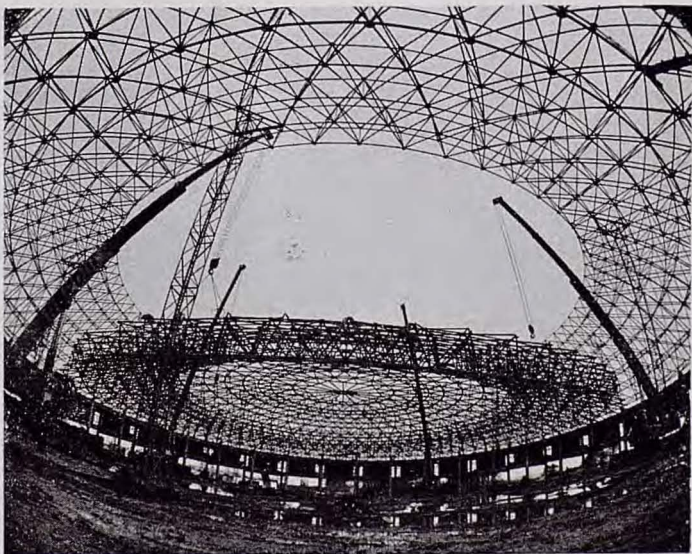
7.



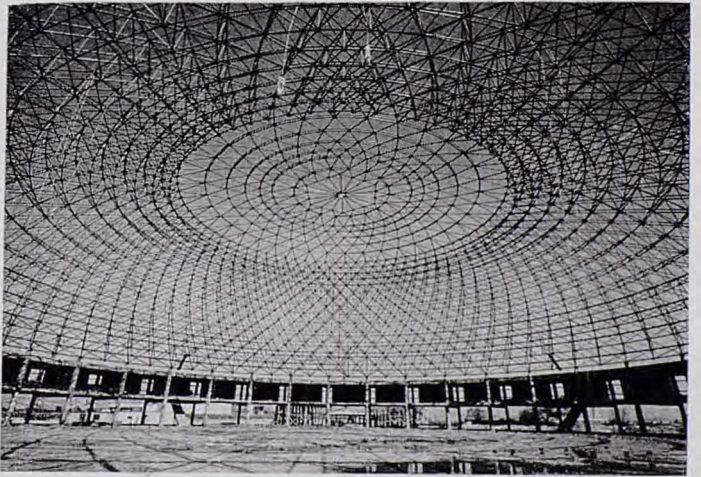
10.



8.



11.



#### 2.2.3.4. Determinación del canto de la lámina ficticia.

Igualmente, a partir de la igualdad de deformaciones en la lámina ficticia y en la malla, se obtiene:

$$h' = \sqrt{3} \cdot \beta \cdot l = \sqrt{3} \cdot h$$

#### 2.2.4. Tabla de símbolos:

l = longitud de las barras de las capas.

d = longitud de las barras diagonales.

h = canto de la malla real.

$$\alpha' = \frac{d}{h}$$

$$\beta = \frac{1}{1}$$

E = módulo de elasticidad del acero.

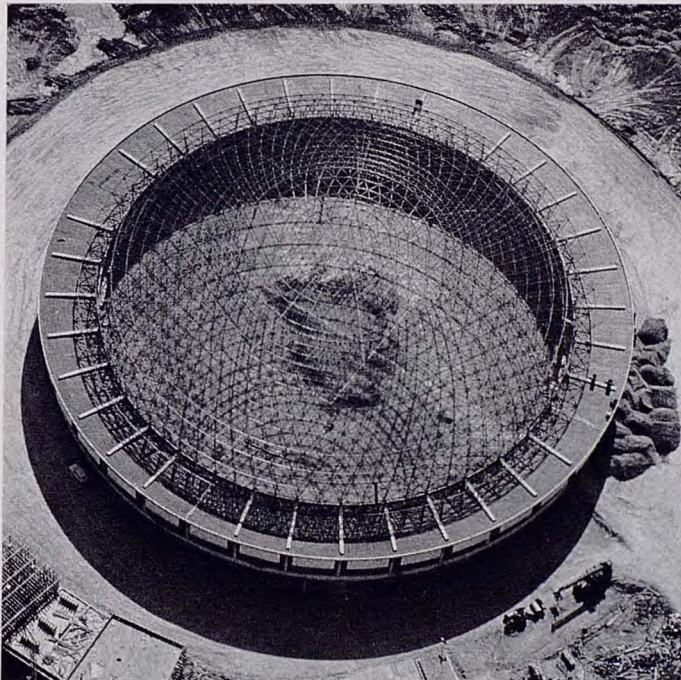
A = área de la sección recta de las barras de las capas.

E' = módulo de elasticidad del material ficticio de la lámina de asimilación

$\nu'$  = coeficiente de Poisson del material ficticio de la lámina de asimilación.

signo (+) = tracción.

signo (—) = compresión.



1. Montaje in situ de la primera fase, formada por dos anillos.
2. Vista parcial de los dos primeros anillos que actuarán como viga de borde.
3. Vista general de los dos primeros anillos, ya terminados.
4. Montaje, en el suelo, de la segunda fase, constituida por 5 anillos.
5. Elevación de la segunda fase.
6. Atornillado de la segunda fase a los dos anillos de borde.
7. Montaje, en el suelo, de la última fase.
8. Elevación de la última fase.
9. Atornillado de la última fase.
10. Vista general de la cúpula durante el atornillado de la última fase.
11. Vista general de la cúpula finalizada.
12. Vista general de la estructura.

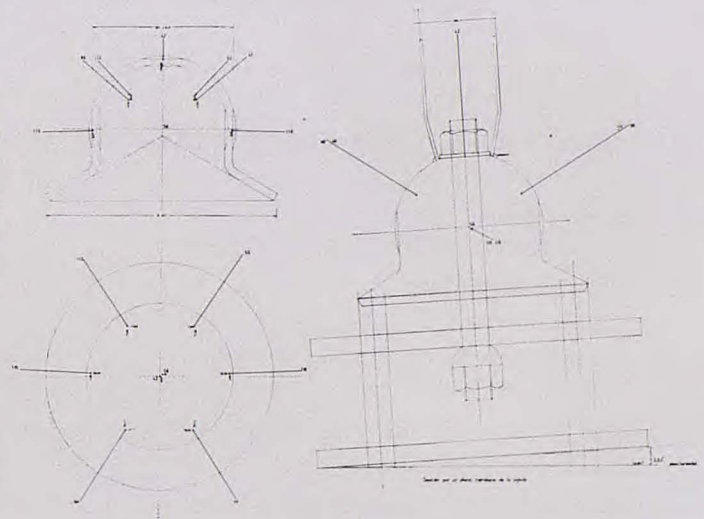
#### 2.3. Definición estructural

Partiendo de los esfuerzos de tracción y compresión así determinados, que alcanzan un máximo de 18 T. en tracción (barras de las capas en la zona del anillo de arranque) y de 13 T. a compresión

(diagonales de la misma zona) se ha procedido al dimensionado de barras y nudos en función de la gama de perfiles tubulares disponibles y de la tipología de nudos del sistema PALC utilizado. Los tubos menores utilizados tienen un diámetro de 60 mm. y los mayores de 108 mm., con espesores entre 2 y 4 mm. Los nudos son de dos tipos: 150 mm. 200 mm. de diámetro con espesores respectivos de 9 y 12 mm. Uno de los más laboriosos problemas de proyecto ha sido la definición del lugar donde debía realizarse en cada nudo el taladro correspondiente a una determinada barra, problema geométrico de intersección entre las rectas secantes a las dos superficies esféricas que definen la cúpula y las esferas de los nudos, con sus centros situados en aquéllas.

El número de nudos de la estructura es de 2161, reducidos, para este problema, debido a la simetría, a 56. La tolerancia debía ser prácticamente nula ya que el más pequeño error, debido a la gran longitud de los anillos, podía dar lugar a una forma estructural distinta de la esférica buscada, con los consiguientes trastornos, no sólo geométricos, sino resistentes. En cada uno de estos nudos se especificaron las coordenadas de los centros de gravedad de los taladros, las longitudes de las barras correspondientes a cada taladro, así como el tipo de nudo opuesto en cada barra concurrente (ver plano n.º 2).

12.



El peso de acero estructural resultante ha sido de 17 kg/m<sup>2</sup>, con un peso total de 102 T., con un empuje máximo horizontal de 0,5 T/ml.

#### 2.4. Fabricación y montaje

La preparación de los elementos estructurales comprendió el corte y conificado de las 9072 barras, con una longitud total de algo más de 19,5 km., y el taladro de los 2.161 nudos con un total de 18.144 agujeros. Esta preparación se llevó a cabo durante alrededor de 5 meses en los talleres de Perfil en Frío S. A. — Comelsa.

El suministro del material, perfectamente diferenciado, junto con las medidas estrictas de almacenamiento en obra permitieron el montaje de la estructura en 40 días a partir de finales de agosto de 1975. Dicho montaje se realizó construyendo los dos primeros anillos en su posición definitiva y el resto de la cúpula en dos partes que, construidas en el suelo, fueron posteriormente elevadas mediante grúas telescópicas. Todo ello se realizó con un equipo de 25 montadores altamente especializados. Se realizó, finalmente, una prueba de carga en la zona de la malla de una sola capa con resultado satisfactorio en cuanto a deformaciones máximas y recuperación.

C. Buxadé i J. Margarit