

Cúpula Metálica en Vitoria * España

C. BUXADE y J. MARGARIT, arquitectos
J. PORTAVELLA, colaborador

sinopsis Esta cúpula autoportante, con forma de casquete esférico de 5.850 m² de superficie, apoya sobre 36 pilares de hormigón equidistantes y dispuestos en una circunferencia de 76 m de diámetro, con vuelo de otros 3 m. La altura libre desde el plano horizontal de los apoyos hasta la clave es de 15 m, siendo el peso total de la estructura de 102 t.

La cúpula está definida, desde su arranque, por una malla tetraédrica de dos capas, perteneciendo los nudos de apoyo a la capa interior, cuyo canto es variable, disminuyendo hacia la clave a medida que se hacen menores los esfuerzos que debe soportar. Esto es consecuencia lógica de la triangulación adoptada, que ha permitido su construcción por anillos, con la consiguiente simplificación del montaje y disminución del tiempo necesario para su ejecución.

El montaje se ha realizado construyendo los dos primeros anillos en su posición definitiva, y el resto de la cúpula en dos partes que, realizadas en el suelo, fueron posteriormente elevadas mediante grúas telescópicas.

La estructura, prevista para soportar una carga total de 120 kp/m², fue calculada mediante el método de asimilación, el cual determina las constantes elásticas de una lámina continua, con dimensiones, forma y condiciones de contorno iguales a las de la cúpula real, imponiendo igualdad de deformaciones. A partir de los esfuerzos en la cúpula ficticia de asimilación, se pueden determinar las tracciones y compresiones en las barras de la malla real.

886-30

En el proyecto de la plaza para Exposición Agrícola y Ganadera de Vitoria, cuyo autor es el arquitecto D. Santiago Esteve, estaba prevista la cobertura del recinto central mediante una cúpula en malla espacial de 76 m de diámetro y flecha de 14 ± 1 m.

El sistema elegido para esta malla ha sido el sistema PALC de Perfil en Frío-Comelsa. Este sistema, diseñado por el arquitecto Francisco Javier Alcalde, consiste en un nudo de acero hemiesférico con aleta, fabricado por embutición o fundido, al que se atornillan las barras correspondientes, las cuales presentan en sus extremos un conificado que abraza a la rosca, la cual recibirá el tornillo que la fijará al nudo.

1. Diseño de la cúpula

Para el diseño de la estructura espacial se analizaron las variables de proyecto mediante el método desarrollado por sus autores

en 1969 (1). Este consiste, explicado sucintamente, en una primera definición de las *necesidades* que deben satisfacerse y que dan lugar al proyecto del que se trata, una cúpula esférica en este caso. Partiendo de los condicionantes básicos que podrían resumirse en:

- a) Cúpula esférica.
- b) Malla espacial con nudo tipo PALC atornillado.
- c) Cobertura de un espacio circular de 76 m de diámetro definido por apoyos situados a 6,632 m.
- d) Flecha máxima desde el plano de arranque: 14 ± 1 m.

(1) «Introducción a una teoría del Conocimiento de la Arquitectura y del Diseño». Margarit, Buxadé, Editorial Blume.

Las necesidades que se plantearon fueron las siguientes:

-
- N1 = Mínimo número de tipos distintos de barras.
 - N2 = Mínimo número de tipos distintos de nudos.
 - N3 = Reducir al mínimo la posibilidad de confusión entre barras distintas durante el montaje.
 - N4 = Reducir al mínimo la posibilidad de confusión entre nudos distintos durante el montaje.
 - N5 = Longitud de las barras comprendidas entre 1 y 3,5 m.
 - N6 = Máximo esfuerzo en barras traccionadas = 30 Mp (a).
 - N7 = Máximo esfuerzo en barras comprimidas = 22 Mp (a).
 - N8 = Máximo esfuerzo en nudos = 25 Mp (a).
 - N9 = Máximo empuje horizontal en los apoyos de 0,5 Mp/m. l. (b).
 - N10 = Utilización de malla espacial sin elementos resistentes diferenciados.
 - N11 = Máxima adaptación de la malla a la magnitud de los esfuerzos.
 - N12 = Máxima espacialidad óptica y resistente (c).
 - N13 = Evitar discontinuidades en esfuerzos y deformaciones.
 - N14 = Posibilidad de realización de pruebas de carga.
 - N15 = Montaje sin cimbras.
 - N16 = Máxima facilidad de control de ejecución.
 - N17 = Resistencia y estabilidad de cualquier zona estructural en todas las fases de montaje.
 - N18 = Mínimas deformaciones durante el montaje.
 - N19 = Mínimo tiempo de trabajo a gran altura de los montadores.
 - N20 = Uso simultáneo de un número limitado de grúas.
 - N21 = Máximo de 3 ó 4 puntos de enganche por grúa.
 - N22 = Borde definido por nudos (d).
 - N23 = Clave con pocas barras concurrentes (e).
 - N24 = Máxima isotropía de la malla (f).
 - N25 = Plazo máximo de construcción: 2 meses.

-
- (a) Función de los perfiles disponibles.
 - (b) Función de la estructura de hormigón prevista, en la cual debe apoyar la cúpula.
 - (c) Intento de actualización de la arquitectura metálica tradicional que, corrientemente, evidencia un comportamiento plano con estabilidad mediante riostras.
 - (d) Para evitar la aparición de una extensa gama de barras cortadas en el borde, con la consiguiente anisotropía del mismo.
 - (e) Para facilitar la solución constructiva.
 - (f) Para evitar concentraciones de esfuerzos.

Una vez planteadas las *necesidades*, el método las supone variables aleatorias binarias (pueden satisfacerse o no satisfacerse) y además las considera, o no, relacionadas entre sí. La matriz de relaciones se expresa a continuación, indicándose con el número 1

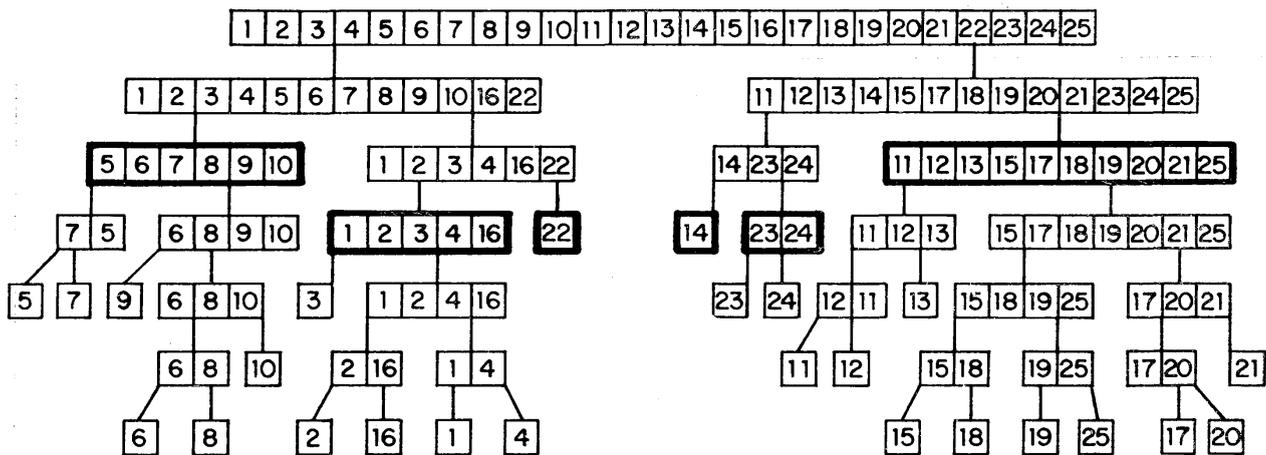
que dos necesidades N_i, N_j tienen entre ellas una relación de dependencia (la satisfacción o insatisfacción de una de ellas no es indiferente a la satisfacción o no satisfacción de la otra).

Matriz de relaciones:

N 1	N 2	N 3	N 4	N 5	N 6	N 7	N 8	N 9	N 10	N 11	N 12	N 13	N 14	N 15	N 16	N 17	N 18	N 19	N 20	N 21	N 22	N 23	N 24	N 25		
	1	1	1							1		1			1						1		1	1	N 1	
			1												1									1	N 2	
															1								1	1	N 3	
															1									1	N 4	
						1	1				1										1		1		N 5	
							1			1	1														N 6	
							1			1	1														N 7	
								1		1	1														N 8	
									1													1			N 9	
										1	1											1		1	1	N 10
										1	1					1	1			1	1			1	1	N 11
											1					1	1			1	1	1		1		N 12
												1				1	1			1	1	1	1	1		N 13
													1						1						1	N 14
														1		1	1	1	1	1	1				1	N 15
															1					1					1	N 16
																1	1	1	1					1	1	N 17
																	1	1	1					1	1	N 18
																		1	1						1	N 19
																			1						1	N 20
																									1	N 21
																									1	N 22
																									1	N 23
																										N 24

Se tienen, pues, una serie de necesidades (puntos) relacionadas entre sí (lazos), es decir, un grafos del problema de proyecto. Se trata, ahora, de agrupar las necesidades de forma que puedan estudiarse en conjuntos de pequeño número de elementos para, así, rebajar el grado de complejidad del problema. Esta partición del conjunto de necesidades en subconjuntos (solicitaciones funcionales) se hace en base a la teoría de la información y buscando entre el gran número de particiones posibles aquella cuya característica sea la de que la información perdida por el sistema al transformarse en un conjunto de subsistemas sea mínima. La expresión de la información perdida es com-

pleja 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 núm. 1 (SF1) = necesidades 5, 6, 7, 8, 9, 10.

Solicitud funcional núm. 2 (SF2) = necesidades 22.

Solicitud funcional núm. 3 (SF3) = necesidades 1, 2, 3, 4, 16.

Solicitud funcional núm. 4 (SF4) = necesidades 23, 24.

Solicitud funcional núm. 5 (SF5) = necesidades 14.

Solicitud funcional núm. 6 (SF6) = necesidades 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. SOLICITACION 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 los 25 Mp 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. SOLICITACION FUNCIONAL 2

N22. Necesidad

SF2 (1) = Definición geométrica de la cúpula por anillos paralelos.

SF3. SOLICITACION 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.

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. SOLICITACION FUNCIONAL 4

N23	N24	→ Necesidades
SF4 (1) SF4 (2)	SF4 (3)	

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. SOLICITACION FUNCIONAL 5**N14. Necesidad**

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

SF6. SOLICITACION FUNCIONAL 6

N11	N12	N13	N15	N17	N18	N19	N20	N21	N25	→ Necesidades
SF6 (1) SF6 (2)	SF6 (3)	SF6 (4)	SF6 (5) SF6 (6)	SF6 (7) SF6 (8) SF6 (9)	SF6 (10) SF6 (11) SF6 (12)	SF6 (13) SF6 (14) SF6 (15)	SF6 (16) SF6 (17)	SF6 (18) SF6 (19)	SF6 (20)	

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 en el 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)	SF6(4)	SF6 (5)	SF6(6)	SF6 (7)	SF6 (8)	SF6 (9)	SF6 (10)	SF6 (11)	SF6 (12)	SF6 (13)	SF6 (14)	SF6 (15)	SF6 (16)	SF6 (17)	SF6 (18)	SF6 (19)	SF6 (20)		
+0,9	+0,5	+0,5	+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		+0,1	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	+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	SF6 (10)
											+0,1	+0,5	+0,5	+0,1	+0,9	+0,1	+0,5	+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)
																	+0,1		SF6 (18)
																	+0,9		SF6 (19)

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

$$J = 1 - \frac{\text{lazos cortados por la sollicitación funcional considerada}}{\text{lazos existentes en la sollicitación funcional considerada}}$$

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

Los resultados obtenidos han dado en todos los casos idéntico valor a varias preformas. Así, en la sollicitación 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 sollicitaciones funcionales han sido:

- SF1: SF1 (2), SF1 (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:

Cúpula triangulada por anillos según paralelos, con una tipología de nudos y barras adecuada a la resistencia y a la geometría, en función del «stock» existente, con distintivos claros de identificación que eviten posibles confusiones. La malla será de canto y modulación variables y definirá una superficie esférica sin elementos rigidizadores relevantes, con barras de longitud comprendida entre 1 y 3,5 m sin superar los 25 Mp de esfuerzo axial.

Deberá existir uniformidad de trabajo en barras y nudos situados a una misma altura, así como continuidad en el comportamiento de barras y nudos adyacentes pertenecientes a un mismo meridiano.

La malla será simétrica respecto a cualquier plano meridiano, y la clave estará formada por barras concurrentes. El borde, zona de máximas tracciones, se descompondrá en el mayor número posible de anillos, quedando todos ellos involucrados en la malla.

La construcción se realizará por anillos en el suelo elevándose posteriormente por zonas no necesariamente autorresistentes, pero que requieran un mínimo número de apoyos, zonas en las que se tendrán que definir los correspondientes puntos de enganche de las grúas. Antes de la elevación se realizarán pruebas de carga parciales.

2. Estructura proyectada y realizada

2.1. DEFINICION GEOMETRICA

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 metros (fig. 1).

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 metros. 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 m².

La figura 2 representa, en planta, sin las barras diagonales que unen la capa exterior con la interior, la triangulación adoptada, cuyas características son:

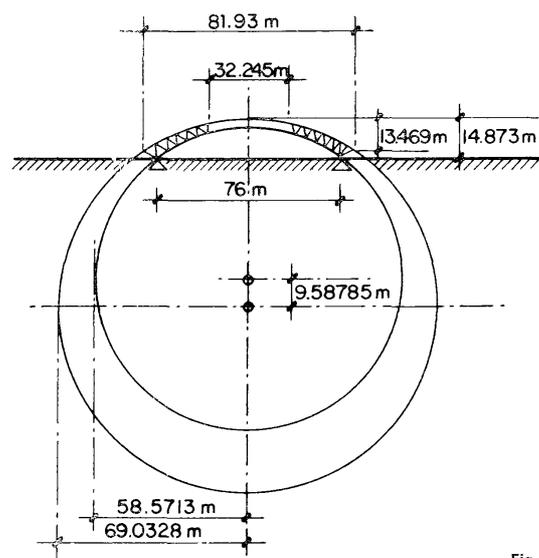
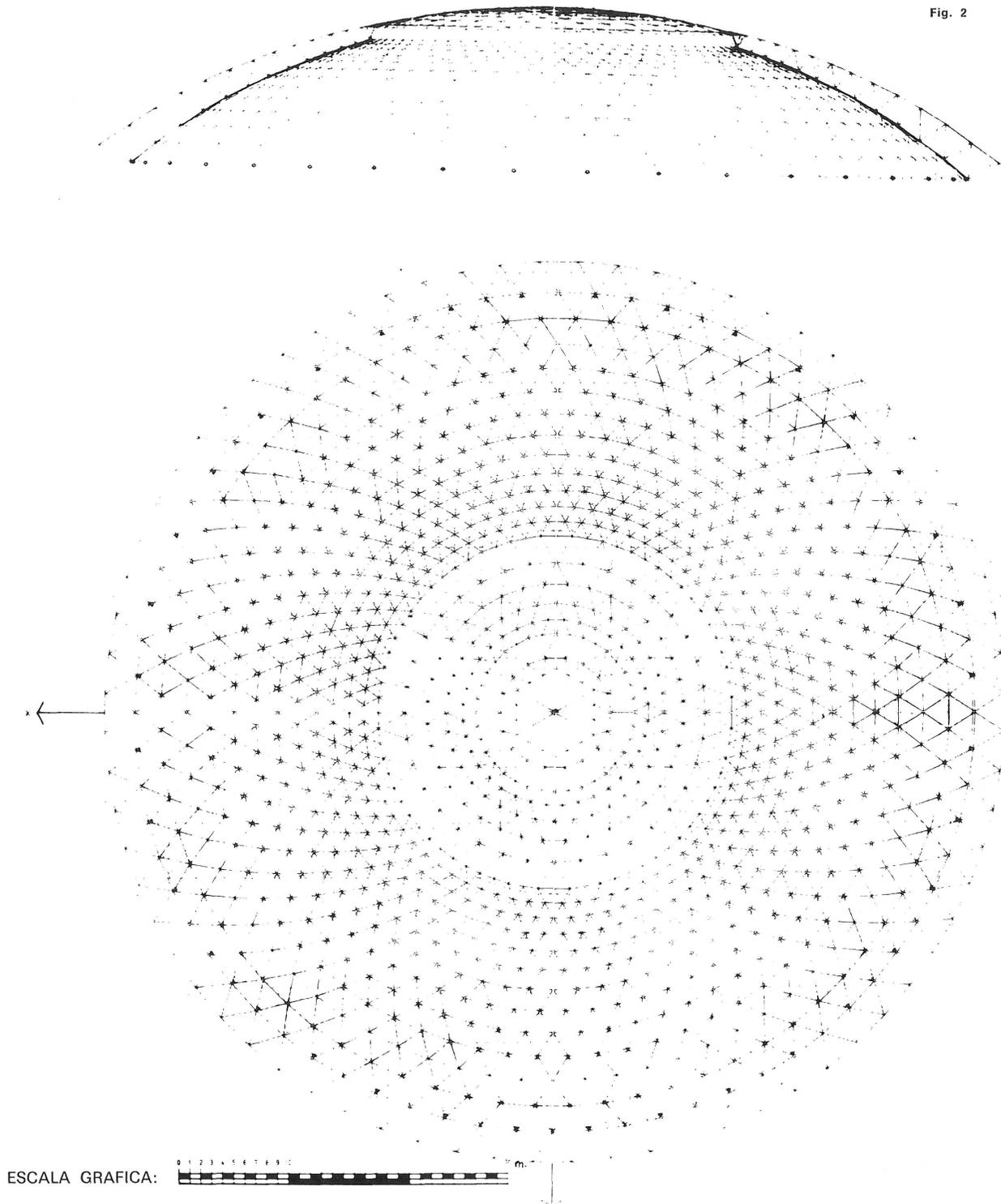


Fig. 1

Fig. 2



- 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

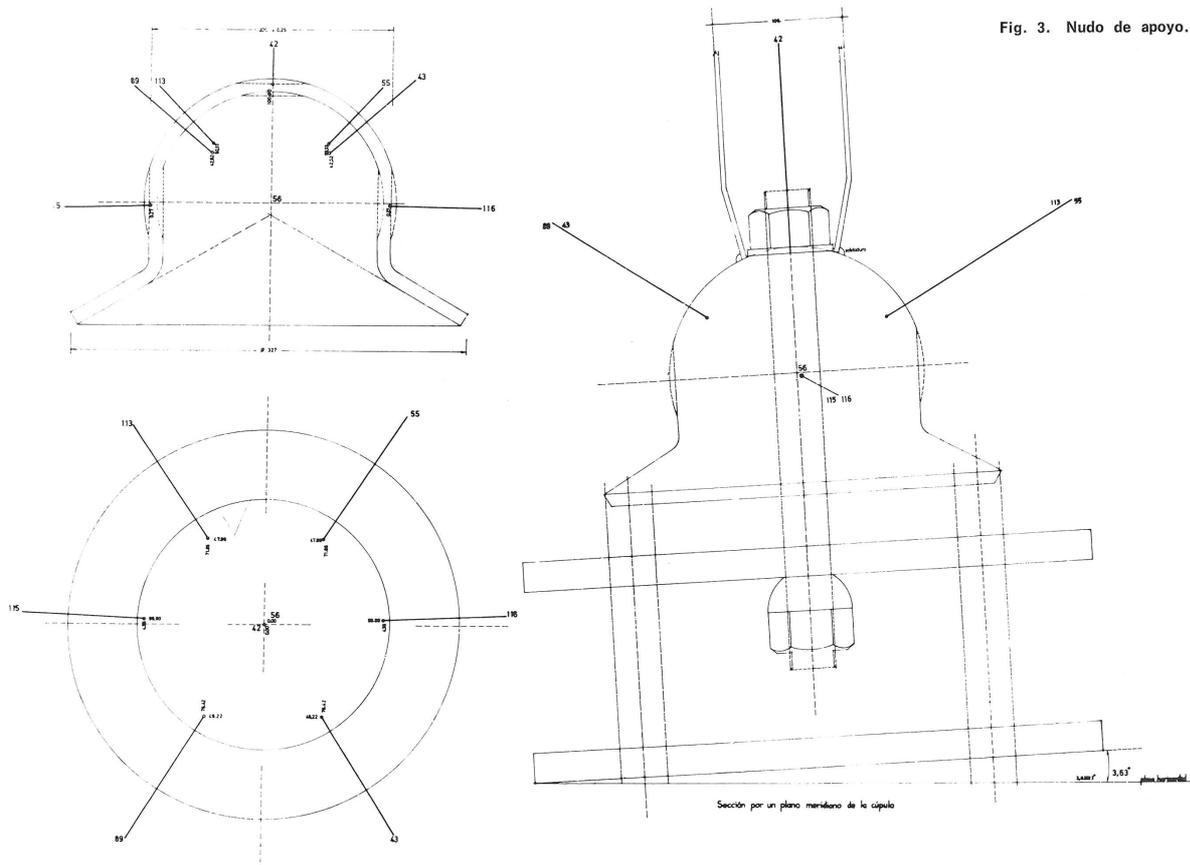
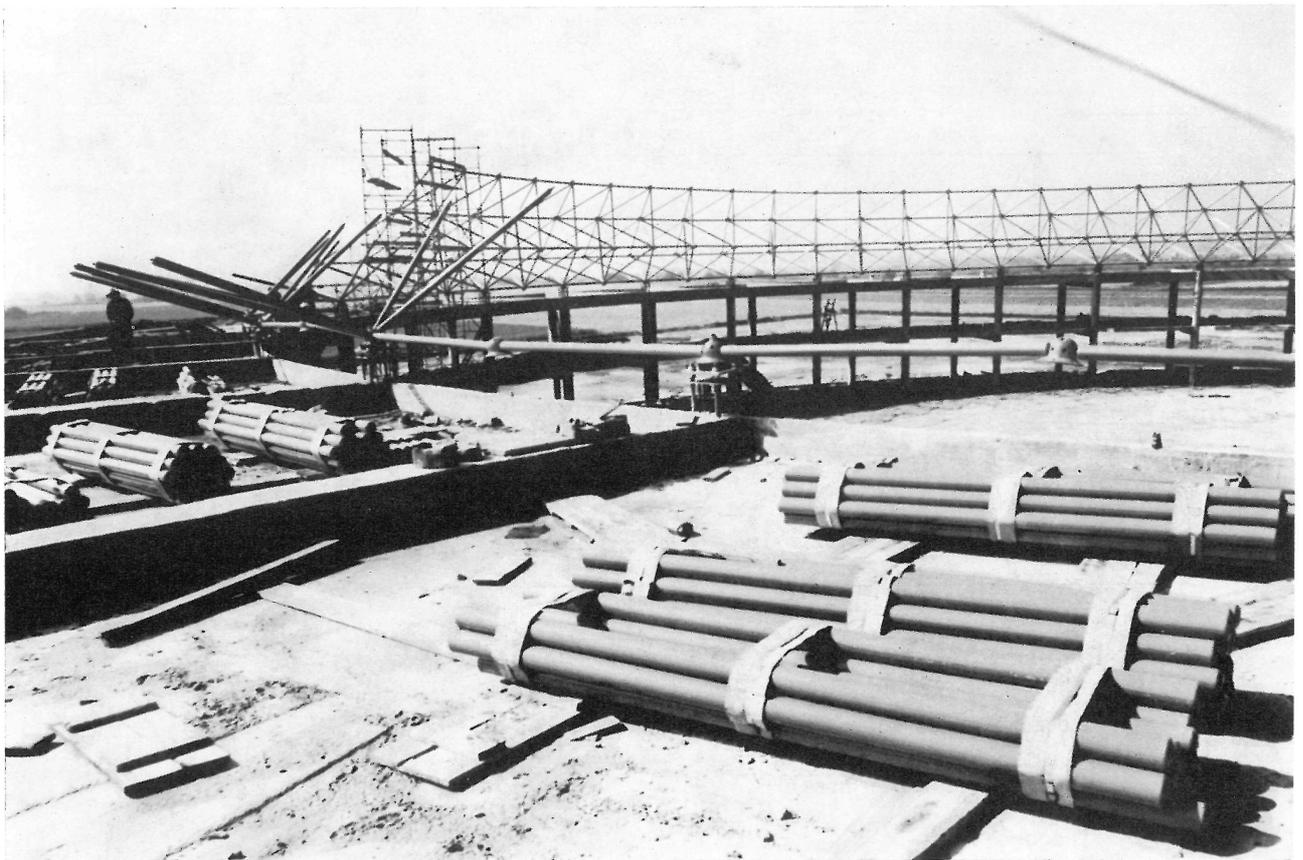


Fig. 3. Nudo de apoyo.

Fig. 4. Montaje in situ de la primera fase, formada por dos anillos.



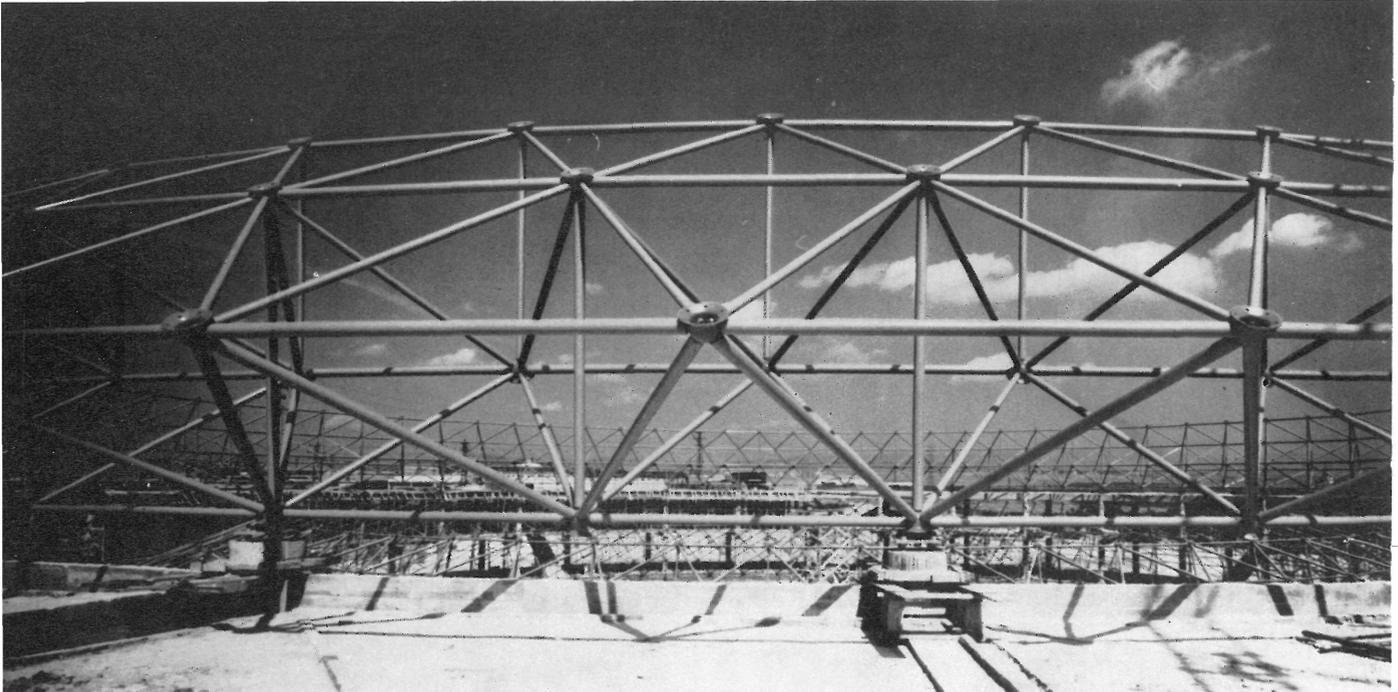
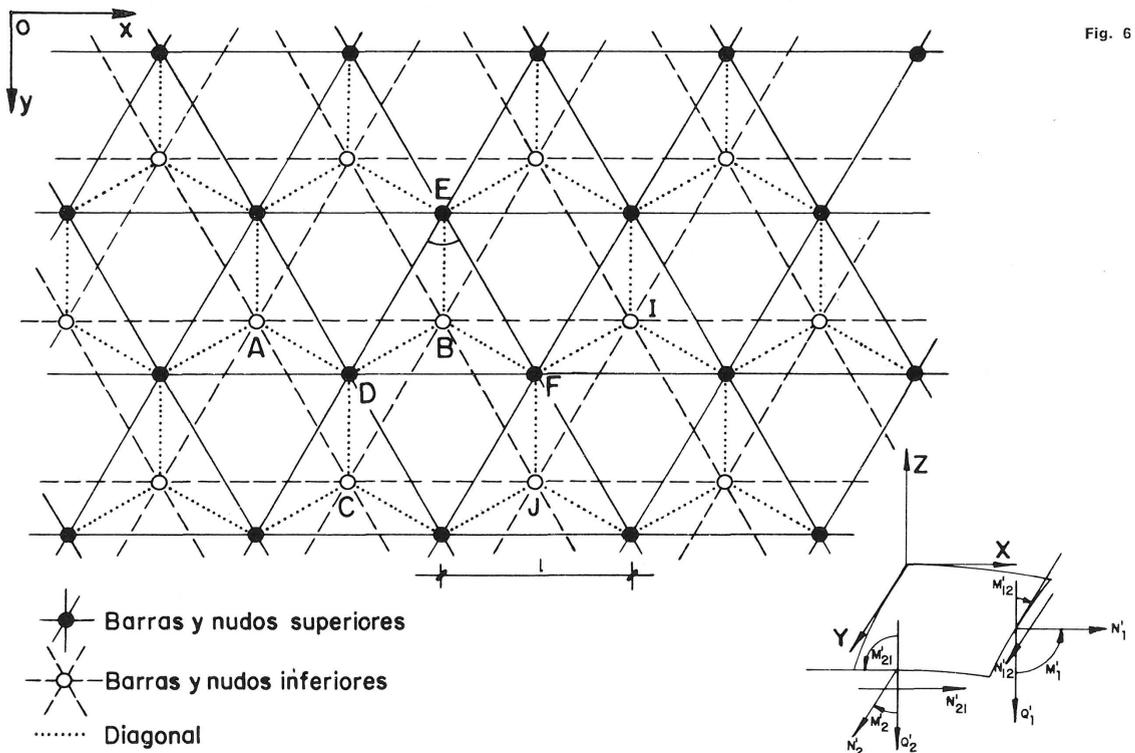


Fig. 5. Vista parcial de los dos primeros anillos que actuarán como viga de borde.

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 (fig. 3).



2.2. CALCULO

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

- sobrecarga de nieve 60 kp/m²,
- sobrecarga de viento 15 kp/m² (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),
- concargas y sobrecargas de uso. 45 kp/m²,
- 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 isótropas, a partir de cuyos 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 isótropa cuyo plano medio coincida, 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 isótropa 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

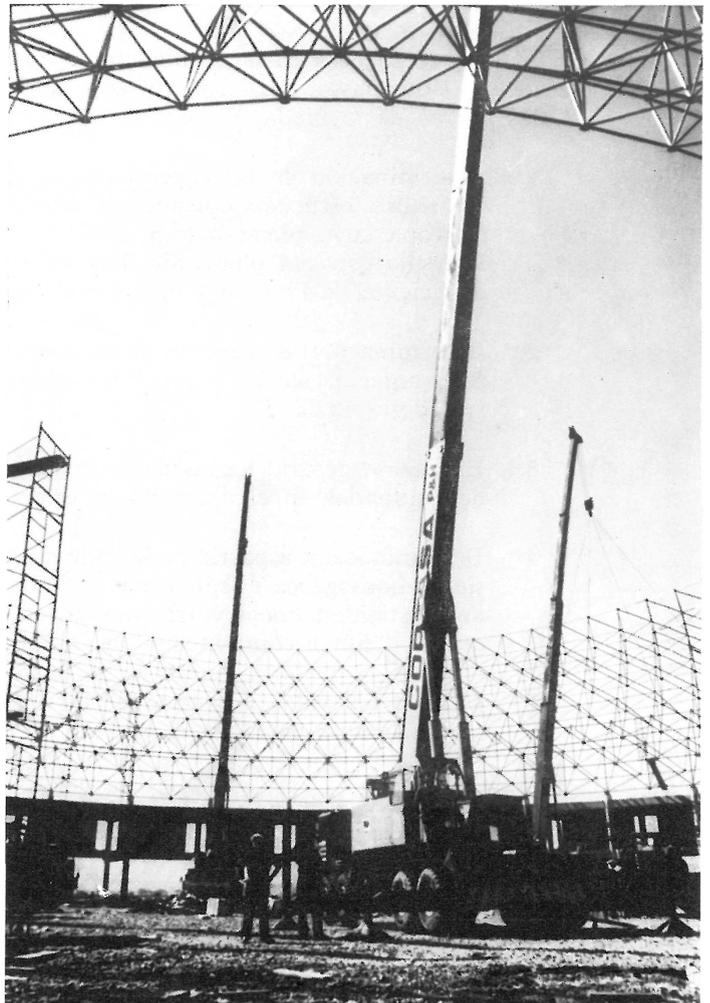
(1) Puede verse «Cálculo matricial de estructuras de barras». Margarit, Buxadé, Ed. Blume, 1969.

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



Fig. 7. Montaje, en el suelo, de la segunda fase, constituida por 5 anillos.

Fig. 8. Elevación de la segunda fase.



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 barras de la malla, en función de los esfuerzos en la estructura continua, homogénea e isótropa 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 (fig. 6):

Fig. 9. Atornillado de la segunda fase a los dos anillos de borde.

Fig. 10. Montaje, en el suelo, de la última fase.

Fig. 11. Elevación de la última fase.



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

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

2.2.2.2. *Tracciones y compresiones debidas al esfuerzo axial de lámina N'_2 en la dirección del eje Y:*

$$P_{DF}^{N'_2} = P_{AB}^{N'_2} = -\frac{l}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot N'_2 ;$$

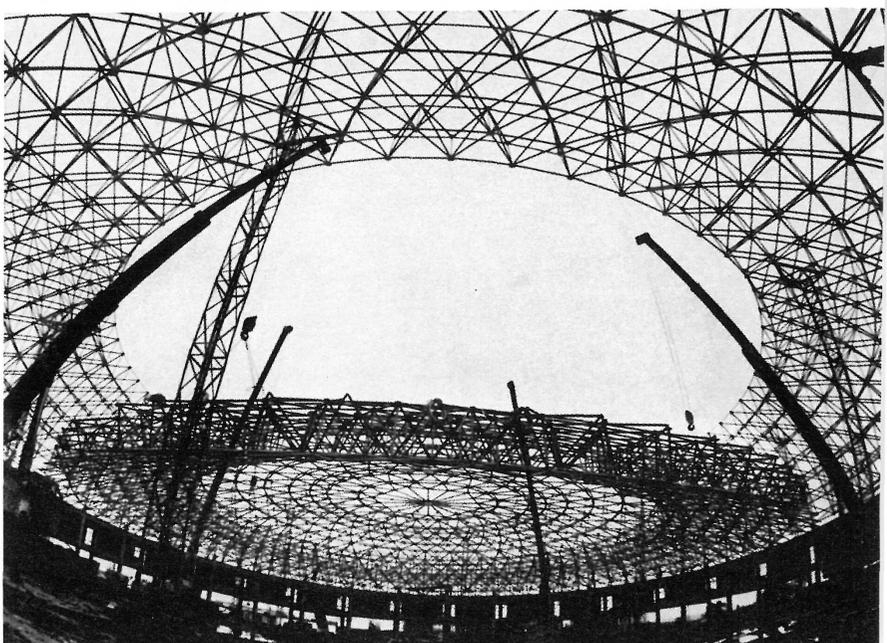
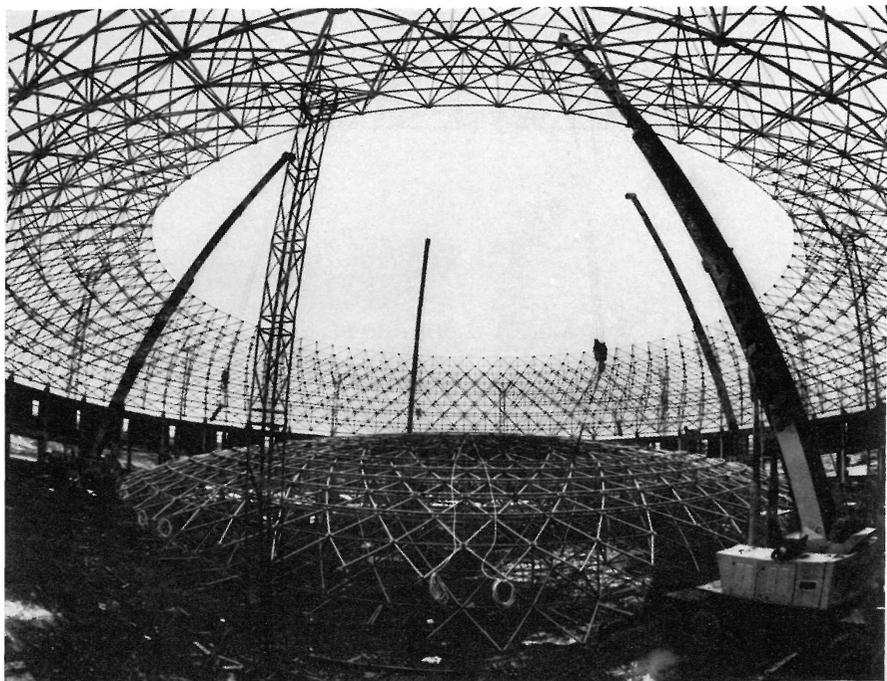
$$P_{DE}^{N'_2} = P_{EF}^{N'_2} = P_{AC}^{N'_2} = P_{BC}^{N'_2} = \frac{l}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot N'_2 .$$

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

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

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:*

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



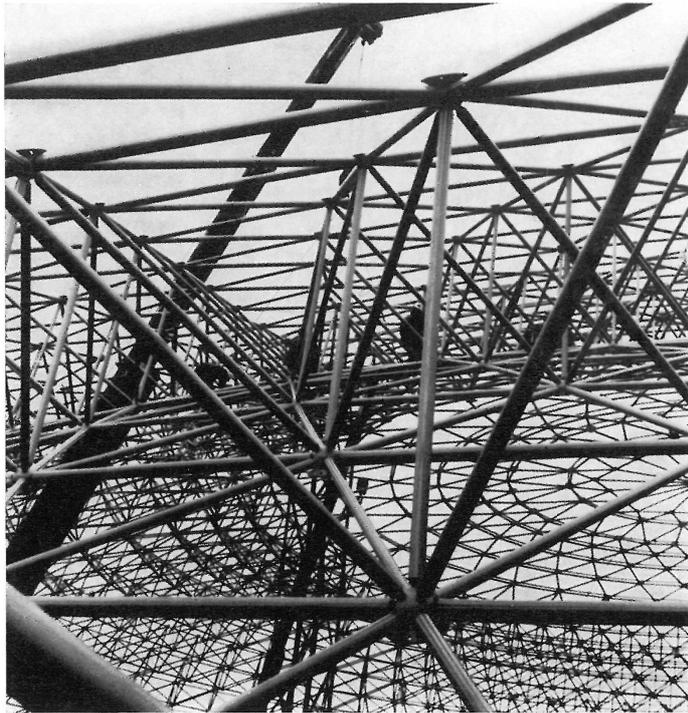


Fig. 12. Atornillado de la última fase.

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:*

$$P_{BE}^{Q_2} = \frac{\alpha \cdot l}{\beta} \quad ;$$

$$P_{BF}^{Q_2} = P_{BD}^{Q_2} = - \frac{\alpha \cdot l}{2 \cdot \beta} \cdot Q_2 \cdot$$

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

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

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

$$P_{ED}^{M'_2} = P_{EF}^{M'_2} = - \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \beta} \cdot M'_2 \quad ; \quad P_{DF}^{M'_2} = -P_{AB}^{M'_2} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \beta} \cdot M'_2 \quad ;$$

$$P_{AC}^{M'_2} = P_{BC}^{M'_2} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \beta} \cdot M'_2 \cdot$$

Fig. 13. Vista general de la cúpula durante el atornillado de la última fase.



2.2.2.8. *Tracciones y compresiones debidas a los momentos torsores $M'_{12} = M'_{21}$:*

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

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 :*

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sqrt{3} \cdot l}{4 \cdot A \cdot E} \cdot N'_1 \quad ; \quad \varepsilon_y = -\frac{l}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot A \cdot E} \cdot N'_1 \\ \varepsilon_x &= -\frac{l}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot A \cdot E} \cdot N'_2 \quad ; \quad \varepsilon_y = \frac{l \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot A \cdot E} \cdot N'_2 \end{aligned} \quad [1]$$

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

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma'_1}{E'_x} - \nu'_x \cdot \frac{\sigma'_2}{E'_y} \quad ; \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma'_2}{E'_y} - \nu'_y \cdot \frac{\sigma'_1}{E'_x} \quad [2]$$

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

Igualando las expresiones [1] y [2] se obtiene:

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

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.

$\alpha = d/l$.

$\beta = h/l$.

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.

ν' = coeficiente de Poisson del material ficticio de la lámina de asimilación.

signo (+) = tracción.

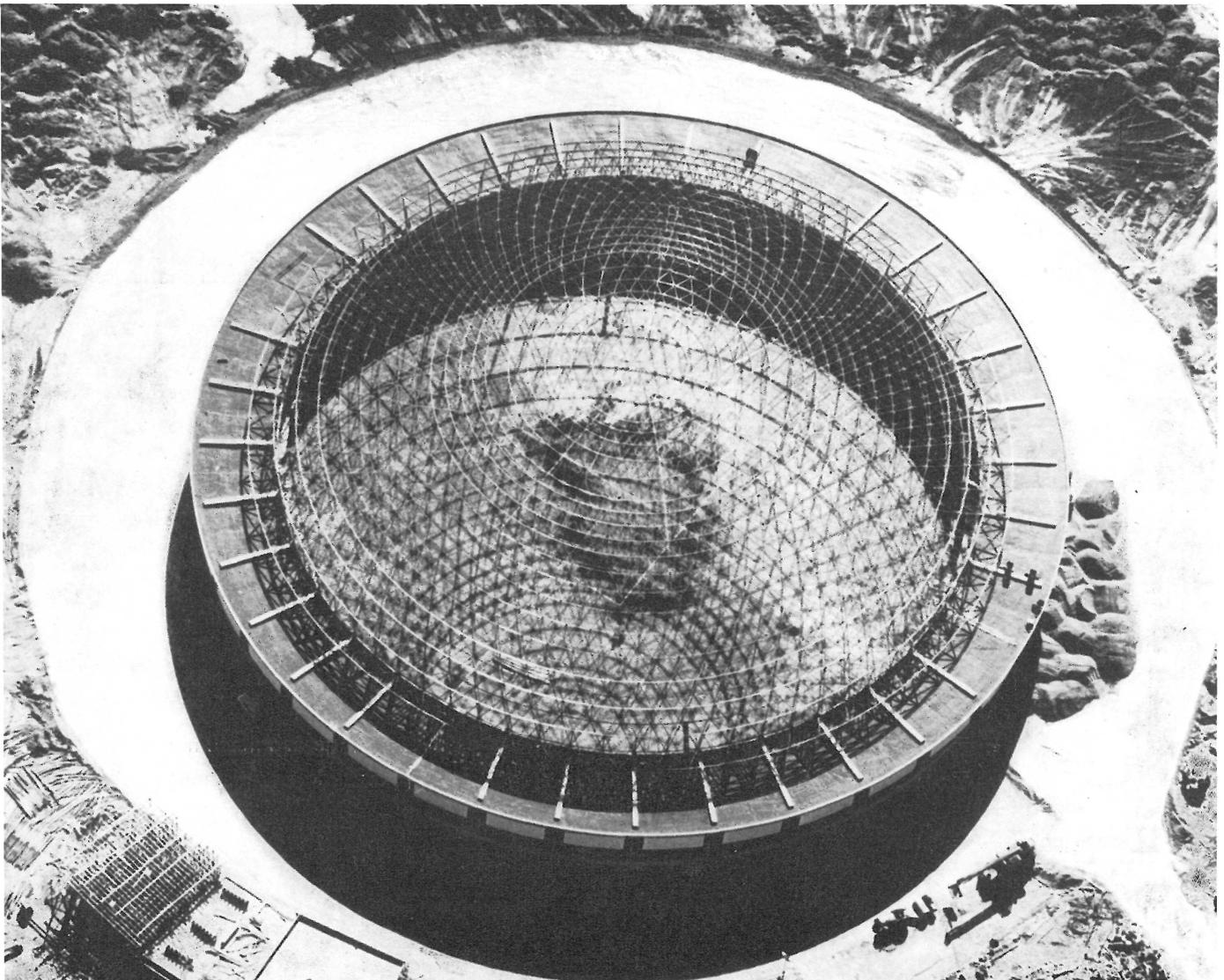
signo (−) = compresión.

2.3. DEFINICION ESTRUCTURAL

Partiendo de los esfuerzos de tracción y compresión así determinados, que alcanzan un máximo de 18 Mp en tracción (barras de las capas en la zona del anillo de arranque) y de 13 Mp 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 y 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 2.161, 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.

Fig. 14. Vista general de la cúpula finalizada.



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 (fig. 3).

El acero estructural resultante ha sido de 17 kg/m², con un total de 102 t, con un empuje máximo horizontal de 0,5 Mp/m.l.

2.4. FABRICACION Y MONTAJE

La preparación de los elementos estructurales comprendió el corte y conificado de las 9.072 barras, con una longitud total de algo más de 19,5 km, y el taladrado 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 (figs. 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14).

résumé

Coupole métallique à Vitoria Espagne

C. Buxadé et J. Margarit, architectes

J. Portavella, collaborateur

Cette coupole auto-portante, sous forme de calotte sphérique de 5.850 m² de superficie, appuie sur une circonférence de 76 m de diamètre, avec un encochement de 3 m. La hauteur libre du plan horizontal des appuis à la clé est de 15 m, et le poids total de l'ossature est de 102 t.

La coupole est définie, dès sa naissance, par un treillis tétraédrique de deux nappes, les noeuds d'appui appartenant à la nappe intérieure, dont l'épaisseur est variable, diminuant vers la clé au fur et à mesure que les efforts à supporter sont plus faibles. C'est là la suite logique du treillis adopté, qui a permis sa construction par anneaux, d'où la simplification de l'assemblage et la diminution du temps nécessaire à son exécution.

L'assemblage a été réalisé en construisant les deux premiers anneaux dans leur position définitive, et le reste de la coupole en deux parties qui, réalisés sur le sol, ont été ultérieurement élevées à l'aide de grues.

L'ossature, prévue pour supporter une charge totale de 120 kp/m², a été calculée suivant la méthode d'assimilation, qui détermine les constantes élastiques d'un voile continu, ayant des dimensions, forme et conditions de contour égales à celles de la coupole réelle, imposant des déformations égales. C'est à partir des efforts sur la coupole fictive d'assimilation que peuvent être déterminées les tractions et les compressions dans les barres du treillis réel.

summary

Metal dome - Vitoria - Spanien

C. Buxadé and J. Margarit, architects

J. Portavella, collaborator

This self-supporting dome, in the shape of a spheric cap and with a 5.850 m² surface, rests upon 36 concrete pillars, placed at an equal distance from each other in a circle with a diameter of 76 m and a corbeling of another 3 m. The clear height between the horizontal level of the supports upto the centre of the dome is 15 m and the total weight of the structure is 102 t.

The dome is defined by a two layer tetrahedral grid framework. The supporting nodes belong to the inner layer which has a variable depth and it diminishes towards the crown as the loads it has to support become smaller. This is a logical result of the adopted triangulation which is made possible by the construction with successive rings. Consequently the assembly has been simplified and the construction time has been reduced.

The assembly has been done constructing the first two rings in their final position and the rest of the dome in two parts. These were constructed on the ground and were then lifted by means of telescopic crane.

The structure has been designed to stand a load of 120 kp/m² and was calculated by means of the assimilation method. This method determines the elastic constants of a continuous shell, with the same dimensions, shape and boundary conditions as those of the real dome, assuming the same deflections. From these forces in the fictitious assimilated dome, the tensile and compressive forces in the real grid framework can be worked out.

zusammenfassung

Metallkuppel - Vitoria - Spanien

C. Buxadé und J. Margarit, Architekten

J. Portavella, Mitarbeiter

Diese selbsttragende, sfärlich geformte Kuppel hat einen Gesamtfläche von 5.850 m² und stützt sich auf 36 gleich voneinander entfernten Betonpfeilern. Diese Pfeiler bilden einen Kreis mit einem 76 m Durchmesser und einen 3 m Vorsprung. Die Höhe zwischen dem horizontalen Niveau der Pfeiler und dem Scheitelpunkt ist 15 m. Das Gewicht des Baus ist 102 t.

Die Kuppel wird durch eine doppelschichtiges Flechtwerk definiert. Die tragenden Knoten befinden sich auf der inneren Schicht, deren Höhe abnimmt, wie die zu tragenden Kräfte abnehmen. Dies ist das logische Ergebnis der verwendeten Triangulation. Der Bau wurde mit aufeinanderfolgenden Ringen ausgeführt, wodurch die Montage vereinfacht und die Bauzeit erheblich reduziert wurden.

Bei der Montage wurden zuerst die ersten 2 Ringe in ihrer endgültigen Stellung erbaut, und der Rest der Kuppel wurde in 2 Teilen die auf dem Boden konstruiert und darauf mittelst Teleskopkränen aufgehoben.

Die Struktur, die entworfen ist eine Last von 120 kp/m² zu widerstehen, wurde durch eine Assimilationsmethode berechnet, so dass die elastischen Konstante für eine kontinuierliche Schale berechnet werden konnten, deren Größe, Form und Umriss dieselben waren wie die der wirklichen Kuppel und es wurden dieselben Knickungen angenommen. Von den Kräften der assimilierten Kuppel können die Zugspannungen und die Kompression berechnet werden.