

TRES ESTRUCTURAS DE CUBIERTA SINGULARES

Julio Martínez Calzón.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RESUMEN

Tras exponer una breve serie de cuestiones acerca de la forma en que la estructura resistente de un edificio se relaciona en los momentos actuales con los sistemas arquitectónicos, el autor presenta una serie de tres estructuras metálicas de cubiertas singulares muy variadas en las que, aparte de referirse a los aspectos previamente enunciados, se muestra, a través de las particulares características de cada una, la gran diversidad de soluciones que puede darse en la edificación e industria de nuestro tiempo. Asimismo, se detallan los procesos constructivos empleados, como aspecto de la mayor importancia y cuyo interés e influencia es incluso a veces mucho mayor que el propio diseño en el caso de las obras singulares.

ABSTRACT

After the statment of a brief set of questions concerning the way in wich the resistant structure of a building is related nowadays with the architectural systems, the author presents a sequence of three very varied outstanding roof steel structures. Besides the reference to the aspects previously mentioned they are shown, through the remarkable characteristics of each one, the high diversity of solutions that can be used in the construction and industry today. Likewise, they are detailed the erection procedures employed, as an aspect of great importance whose interest is at times even larger that the design in the case of exceptional works.

Las posibilidades ofrecidas por los potentes programas actuales de cálculo de estructuras tridimensionales han abierto a los ingenieros y arquitectos proyectistas nuevas perspectivas para el diseño y construcción de coberturas de grandes espacios y formas singulares impensables hace pocos años. Esta apertura, como toda nueva posibilidad que se ofrece al ser humano, determina planteamientos y usos muy diferenciados según las circunstancias, intenciones, requerimientos, personas, etc. involucrados en cada proyecto particular.

En unas ocasiones predominará el atenuamiento a las cuestiones preferentemente ingenieriles: costes reducidos; ejecución sencilla, rápida y segura; adecuada utilización de los materiales actuales y tradicionales; mantenimiento y durabilidad ópti-

mos, etc. En otras, serán razones más arquitectónicas las que determinen el resultado final: tratamiento del espacio interior; formas nuevas y provocadoras; conceptos estéticos y materiales de acabado dominados por la moda del momento; funcionalidad y dimensiones ajustadas a nuevos aspectos y propuestas; etc. Y, finalmente, en otro conjunto de casos podrían ser los propietarios o promotores los que, en base a razones de carácter mucho más ajeno a criterios técnicos –aunque sin prescindir de los aspectos antes enunciados– puedan exigir realizaciones megalómanas, exhibicionistas, extravagantes, tal vez cercanas a los sueños, pero que llevan muchas veces a conquistas de nuevos territorios; razones determinadas por los requerimientos de marketing, imágenes de marca o poderío, etc. tan profundamente imposta-

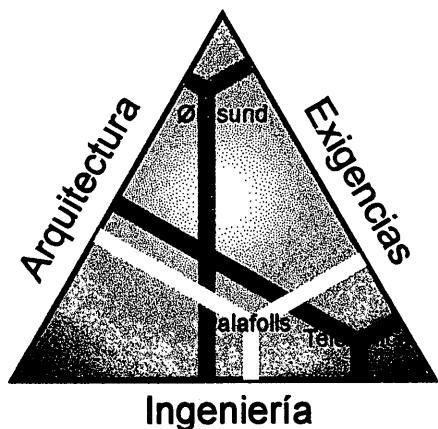
Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de agosto de 1998.

Recibido en ROP:
abril de 1998

das en la, cada vez más, competitiva sociedad de nuestro tiempo.

Esta especie de círculo vicioso-virtuoso que las nuevas posibilidades y exigencias determinan, definen dialécticamente el campo de juego en el que se mueven, no sólo este tipo de construcciones sino otros muchos procesos y circunstancias del mundo de hoy, en un proceso espiral de carácter homeostático, que no es sino una vuelta más del largo camino iniciado en el origen de nuestra civilización. Las gradaciones y matices que podrían establecerse en relación con estas cuestiones son amplísimas y los tres ejemplos de cubiertas que aquí van a describirse ofrecen aspectos muy correlacionados con los factores planteados, si bien todos ellos en dimensiones y condiciones relativamente modestas y próximas a los márgenes correctos y severos de actuación, bastante alejadas de las actuaciones de carácter "futurista" que surgen de forma intermitente.

Sin embargo, a pesar de su relativa modestia, pueden ofrecer una visión activa de lo que se ha pretendido expresar en esta presentación, y que podría completarse con cierta precisión en un esquema de triple entrada: Ingeniería-Arquitectura-Exigencias, que determina de manera bastante ajustada la posición ideal que a nuestro entender se da en cada una de las tres cubiertas:



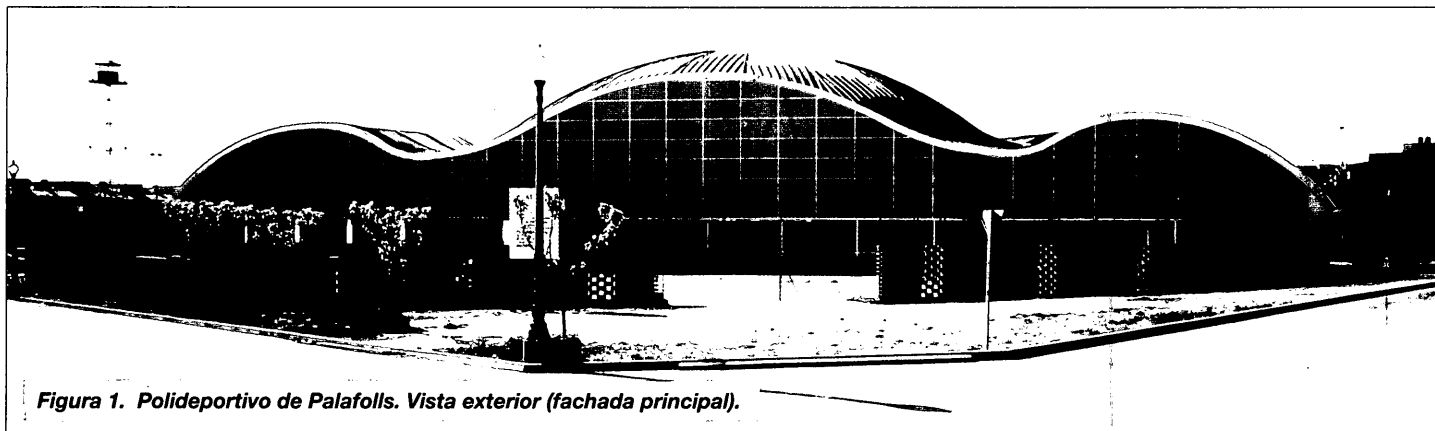
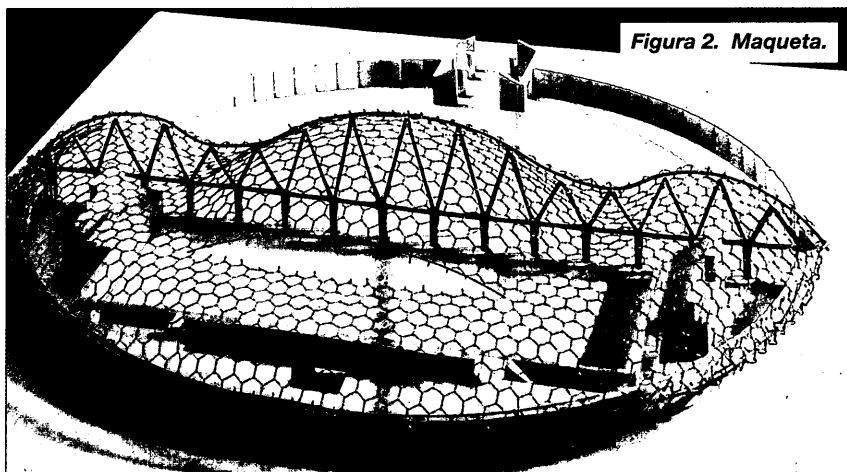
CUBIERTA DEL POLIDEPORTIVO DE PALAFOLLS (BARCELONA)

Arquitecto: Arata Isozaki
Promotor: Ayuntamiento de Palafolls
Constructor: Orona, S. Coop.

El aspecto dominante de esta cubierta espacial viene determinado por su forma irregular, un tanto en la línea que la famosa cubierta del club Tachira planteó en los años 50 a Eduardo Torroja, aunque en el presente caso más contenida y sujeta a un mayor control y simetría del espacio.

A partir de una propuesta formal del arquitecto, basada en una maqueta de trabajo (fig. 2) que incluía el conjunto constituido por la cubierta y la zona al aire libre, en una visión Ying-Yang muy intensa, el interés de la estructura se centró en tres aspectos principales:

1. Geometrización de la idea formal arquitectónica.
2. Elección adecuada del canto y módulo de la malla para que la visión interior de la forma no se difumine por la mezcla y superposición de elementos.



Zona Central - (1)

Casquete esférico de 24.35 m de radio exterior, seccionado por dos planos verticales paralelos separados 20.12 m, que constituyen:

La fachada principal acristalada ubicada en un diámetro del complejo global, cuyo borde superior ondulado se recoge mediante una gran celosía triangular formada con perfiles aligerados tipo Boyd (ver fig. 7) y apoyada en soportes verticales de hormigón.

Un ventanal interno en forma de gajo, rigidizado por una celosía vertical que conecta el borde superior perteneciente a la zona cupular central y el inferior correspondiente a la zona periférica.

Zona Periférica - (2)

Superficie toroidal de radio principal 24.75 m y radio secundario de 12.74 m, que cubre la semicorona circular exterior de la planta cubierta. Se incluyen en esta zona: una pequeña superficie de tipo cónica (4), que hace de transición entre el borde inferior del ventanal interior y el borde superior del cuarto de toroide que forma la zona

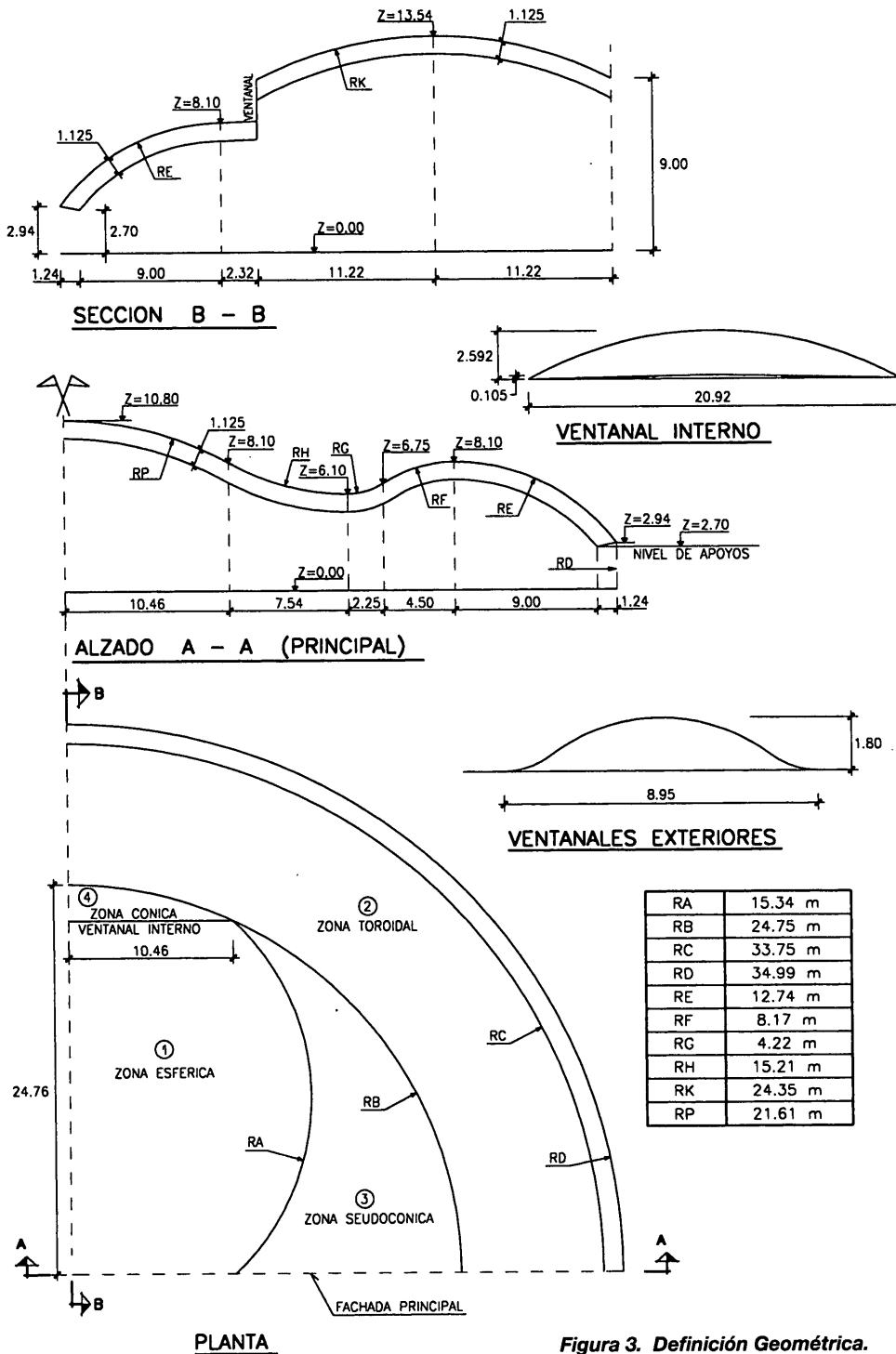


Figura 3. Definición Geométrica.

3. La comprensión del comportamiento resistente para establecer un predimensionado inicial ajustado.

La geometría de la cubierta se configuró mediante tres zonas bien diferenciadas (fig. 3):

periférica; y dos ventanales exteriores, añadidos posteriormente, formados mediante plegaduras pseudo-cónicas del borde circular externo del toroide, en los cuales se sitúan sendas celosías triangulares de rigidez y fijación de las superficies acristaladas de dichos ventanales.

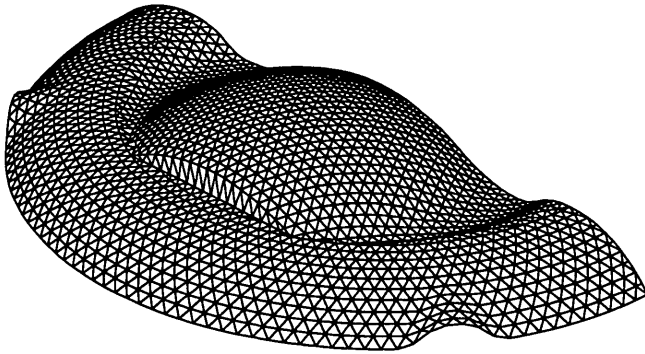


Figura 4. Perspectiva de la cubierta.

Zona de Transición - (3)

Dos superficies pseudo-cónicas circulares de tres radios: 15.21, 4.22 y 8.18 m; que van variando en forma lineal desde un máximo en la fachada principal, hasta anularse en los vértices del ventanal interior. Constituyen zonas de valle, parecidas a semicuernos en planta, y permiten la recogida y canalización de las aguas a zonas bien definidas.

Debido a las relativamente reducidas dimensiones de la estructura y las rápidas transiciones de forma de su superficie (fig. 4) se necesitaba, como se ha dicho, adoptar un canto estructural total pequeño, que permitiera mantener la continuidad visual interna exigida arquitectónicamente, de manera que el espectador percibiera los matices de la forma y la espacialidad buscada; aunque ello diera lugar a mayor número de ba-

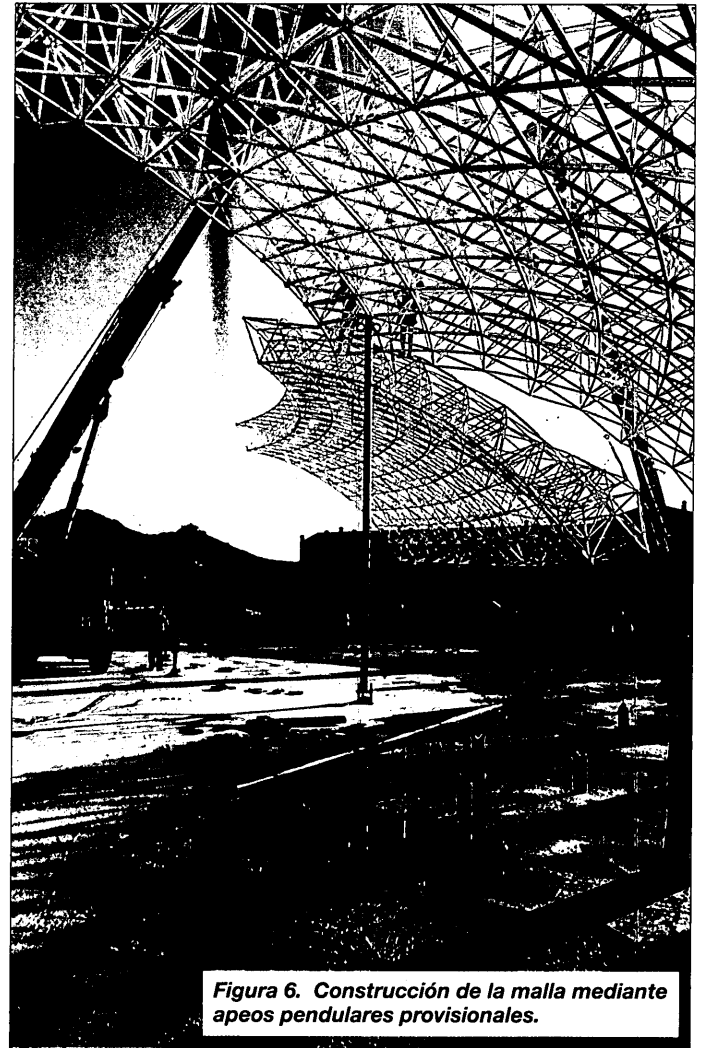


Figura 6. Construcción de la malla mediante apeos pendulares provisionales.

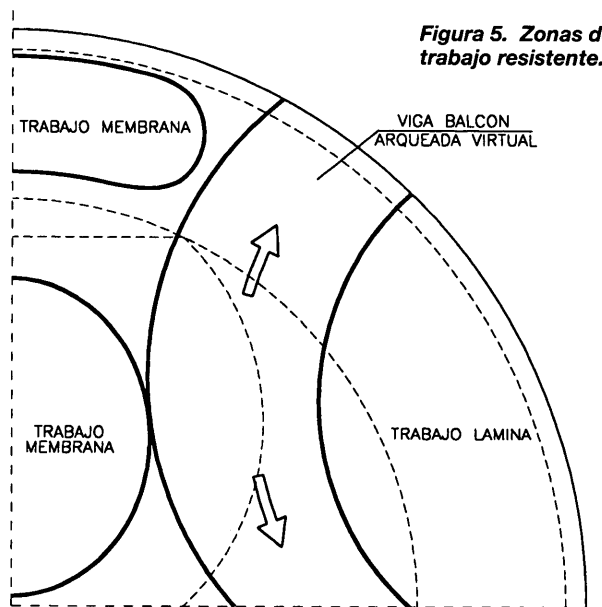


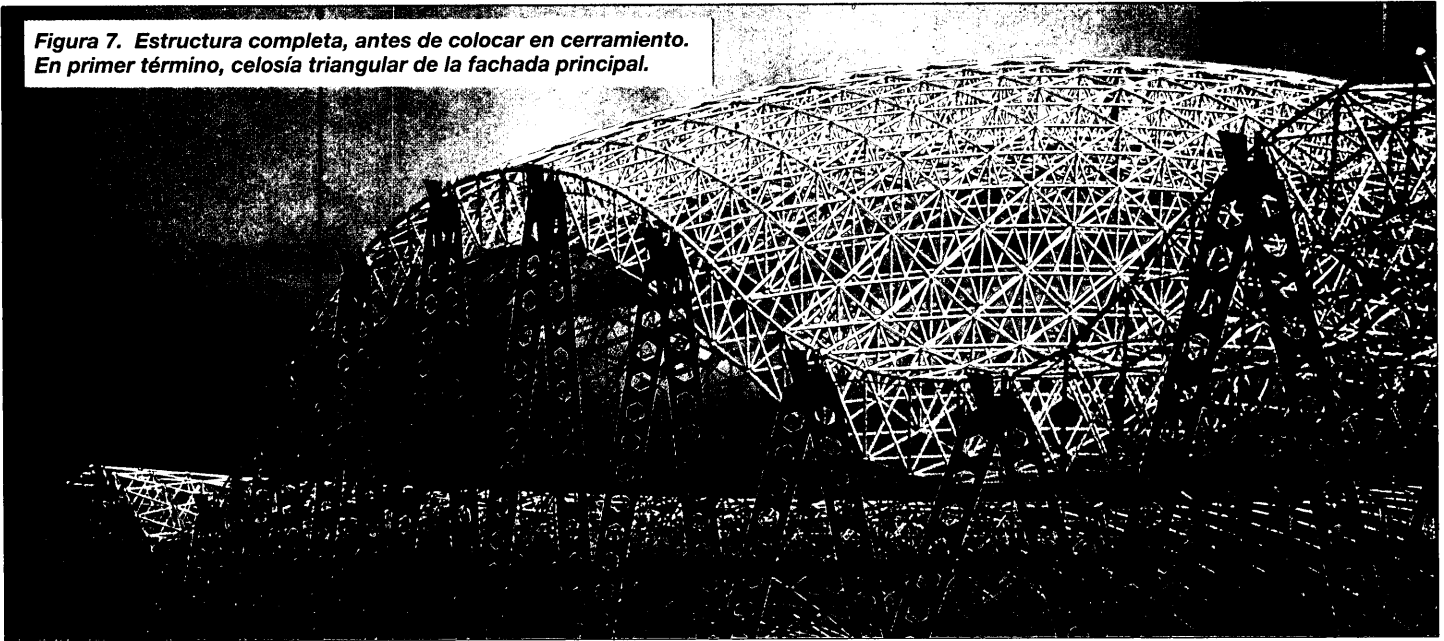
Figura 5. Zonas de trabajo resistente.

rras y nudos. El valor de 1.125 m (L/60) elegido determinó barras de longitudes comprendidas entre 1.15 y 1.75 m, lo cual permitió que, con la distribución tridireccional regular elegida, las superficies teóricas pudieran ser prácticamente respetadas. Solamente en los bordes de contacto entre las zonas periférica y de transición fue preciso distorsionar ligeramente la retícula base antedicha, pero en conjunto el sistema se adaptó perfectamente a los requisitos solicitados.

Las coacciones de los apoyos permiten la libre dilatación térmica bidireccional de la cubierta, conjuntamente con una respuesta rígida frente a las acciones horizontales y verticales del conjunto.

El comportamiento resistente diferencia, asimismo, tres zonas (fig. 5): una de trabajo membrana dominante, con esfuerzos directos en el espesor de la cubierta; otra de claro carácter laminar, con apreciables esfuerzos de flexión; y una tercera en forma de dos grandes franjas curvas simétricas, cuya respuesta puede asimilarse muy activamente a la de dos grandes vigas balcón arqueadas, que reciben gran parte de las reaccio-

Figura 7. Estructura completa, antes de colocar en cerramiento. En primer término, celosía triangular de la fachada principal.



nes de las zonas laminares y membranales y que, en conjunto con los apoyos del contorno canalizan los esfuerzos hasta la cimentación.

El análisis y optimización del sistema de barras de la estructura, realizado a partir de las condiciones de deformabilidad de los nudos obtenidas en base a los resultados de ensayos sobre subconjuntos formados por dos barras y un nudo del sistema empleado (tipo Ortz), respondió muy ajustadamen-

te a lo previsto en las fases de desapeo y puesta en carga de la malla durante las fases de ejecución.

Las dimensiones máximas y mínimas empleadas fueron:

Barras desde \varnothing 40.2 mm a \varnothing 115.7

Esferas de nudos desde $d = 60$ mm hasta $d = 210$ m

con un número máximo de barras incidentes de 9 unidades en las primeras y 11 en las últimas.

El peso total de la estructura fue de 64 t, equivalente a 33 kg/m^2 ; 82.8% en barras y 17.2% en esferas.

El proceso constructivo fue de gran sencillez, y se basó en la inclusión de apeos pendulares provisionales dispuestos en puntos interiores convenientemente situados, hasta lograr paulatinamente el cierre de la malla (fig. 6).

Posteriormente, mediante aplicación gradual y sistemática de pequeños descensos homogéneos en todos los apeos, mediante los husillos roscados existentes en la base de los mismos, en sucesivas pasadas del conjunto, se fue liberando gra-

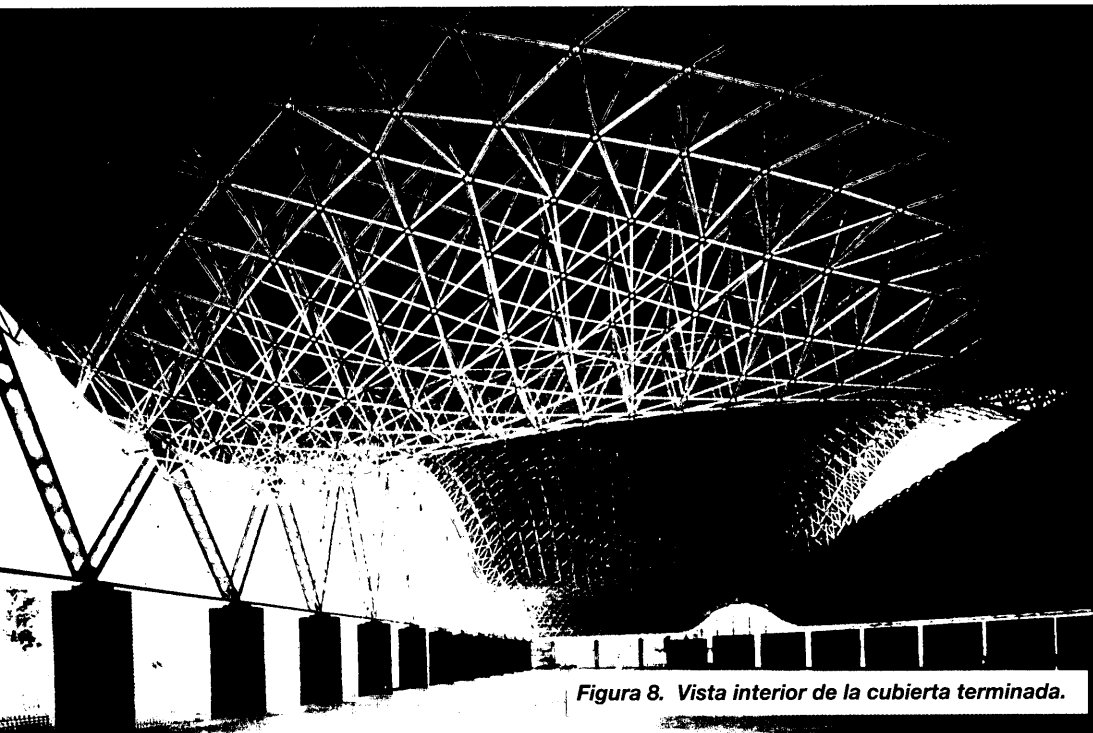


Figura 8. Vista interior de la cubierta terminada.

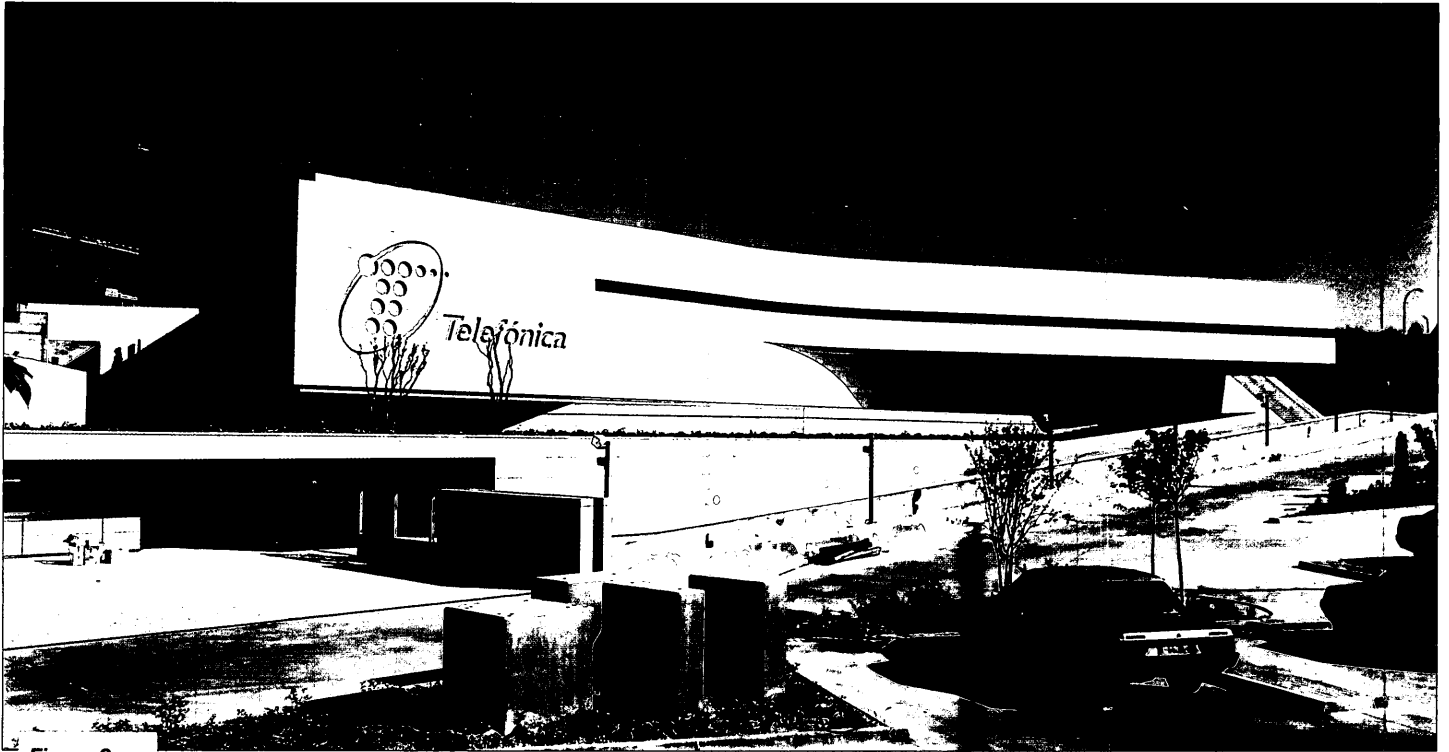


Figura 9.
Centro
operativo
de
Telefónica.
Vista
exterior.



Figura 10. Patio y Cubierta.

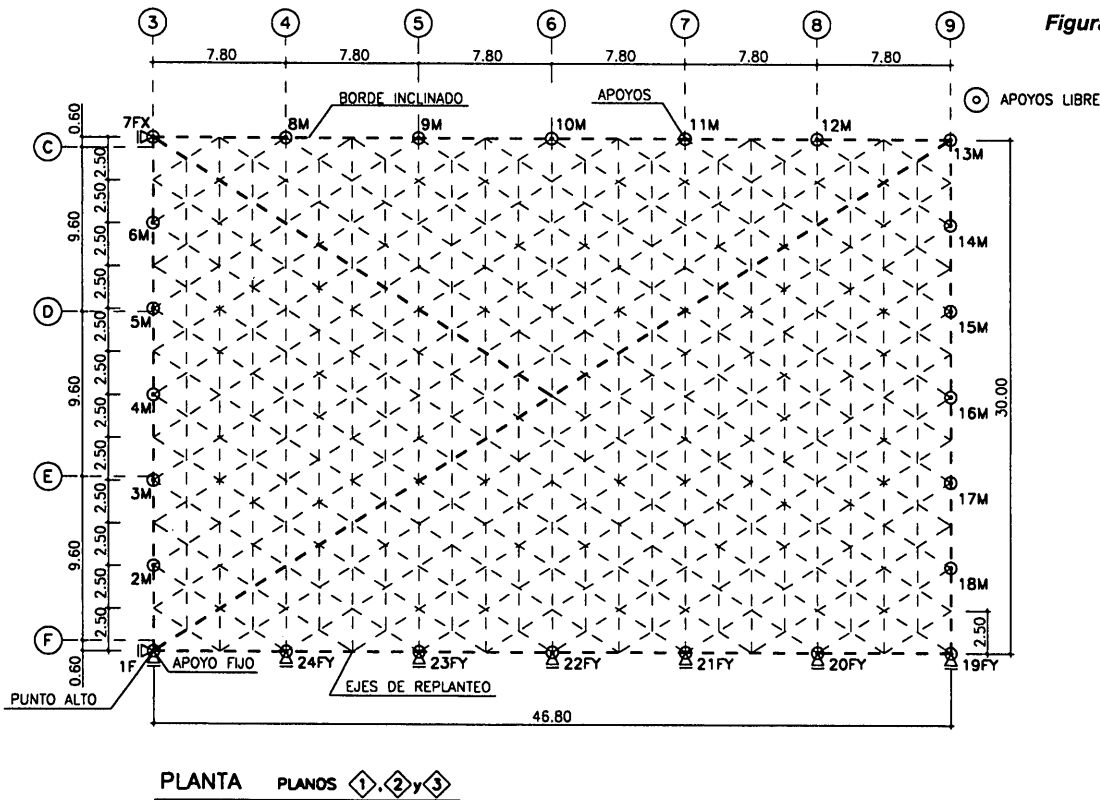


Figura 11. Planta de la cubierta.

lamas practicables que permiten, a la vez que efectuar una protección apropiada respecto al soleamiento y al agua, la ventilación regulada del interior de la cubierta, evitando la concentración de calor que la gran superficie acristalada produciría caso de estar totalmente cerrada.

La tipología de los perfiles IPE en la cubierta y HEB en los faldones verticales fue seleccionada por condiciones arquitectónicas, en la idea de lograr, mediante una disposición unícapa con tres familias de barras a 60°, la adecuada percepción de la forma de la cubierta y un perfecto soporte para los acabados de cristal.

Precisamente, las soluciones bicapa fueron desechadas por la pérdida de forma visual que pueden producir, tal y como se expuso en la cubierta anterior –en la cual se resolvía este problema adoptando un ajustado valor del espesor de la celosía tridimensional–, y que en el caso de sistemas planos es aún más acusado. Podría considerarse, sin embargo, que el sistema elegido de una sola capa de perfiles de canto

La tipología de los perfiles IPE en la cubierta y HEB en los faldones verticales fue seleccionada por condiciones arquitectónicas, en la idea de lograr, mediante una disposición unícapa con tres familias de barras a 60°, la adecuada percepción de la forma de la cubierta y un perfecto soporte para los acabados de cristal.

dualmente la totalidad de la estructura hasta quedar resistiendo autónomamente.

La flecha máxima prevista para esta operación era de 21 mm, en las zonas de las franjas mencionadas obteniéndose valores reales de 19 y 20 mm en dichas zonas simétricas, que avala lo anteriormente establecido.

CENTRO OPERATIVO DE TELEFÓNICA EN MADRID (ARAVACA)

Arquitecto:.....Rafael de Lahoz Castany
 Constructor:Dragados y Construcciones

En este caso la singularidad es arquitectónica y trata de lograr una funcionalidad y formalización intensa para un patio de operaciones (figuras 9 y 10).

La cubierta es de planta rectangular de dimensiones 46.8 x 30 m (fig. 11) y en alzado responde a la idea modificada de una cubierta a cuatro aguas, en la que uno de sus planos se prolonga y elimina a otro, para constituir una cubierta a tres aguas (fig. 12). Los dos planos verticales triangulares que completan la cubierta se constituyen: uno, exterior, acristalado; y otro, interior, abierto, en el que se dispone un sistema motorizado de

Figura 12. Perspectiva.

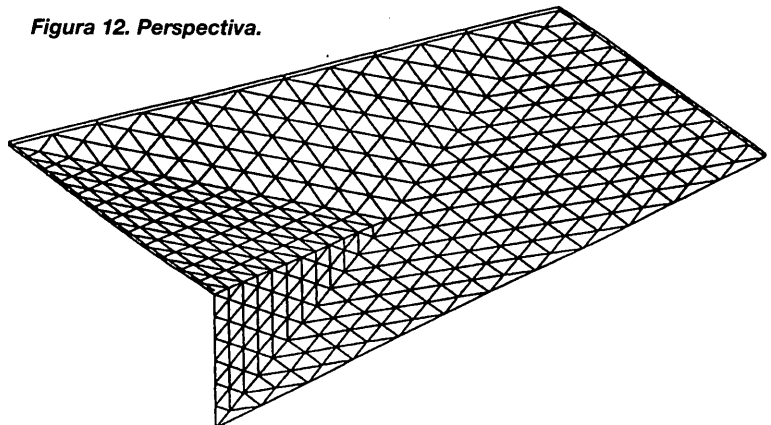
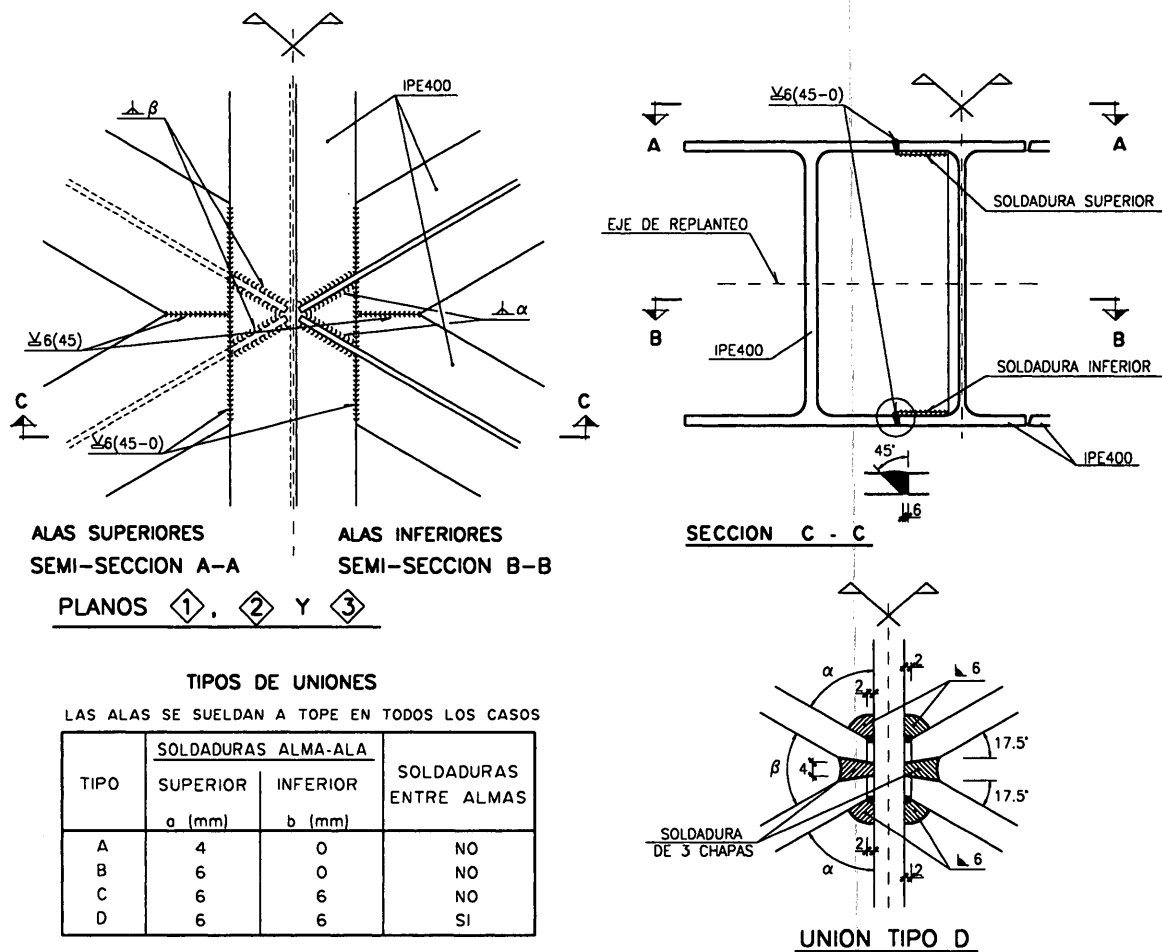


Figura 13. Detalles de uniones entre perfiles.



apreciable es, en realidad, una cubierta de dos capas (las alas de los perfiles) unidas por elementos de alma llena.

El borde rectangular inferior de la cubierta lo constituye un HEB 450 perimetral que descansa en la estructura de hormigón del resto del edificio a través de apoyos separados 7.80 m en los lados largos y 4.80 m en los cortos, además de los existentes en las esquinas.

El principal interés de la estructura se centra en las características adoptadas para las uniones de los nudos, las soluciones de las aristas y el proceso constructivo empleado.

La cubierta, a excepción de las piezas de arista, se forma mediante perfiles IPE 400 continuos en una de las direcciones, y soldados en los nudos en las otras dos. Debido a que el trabajo global del sistema solicita de forma muy ligera a una gran cantidad de barras, y dado que los esfuerzos cortantes en las uniones son también, en general, muy reducidos, se adoptaron para dichas uniones soluciones muy simplificadas en la mayoría de los nudos, en orden a reducir al mínimo las soldaduras entre perfiles y, lo que es aún más importante, que su ejecución fuera de la mayor simplicidad y coste reducido.

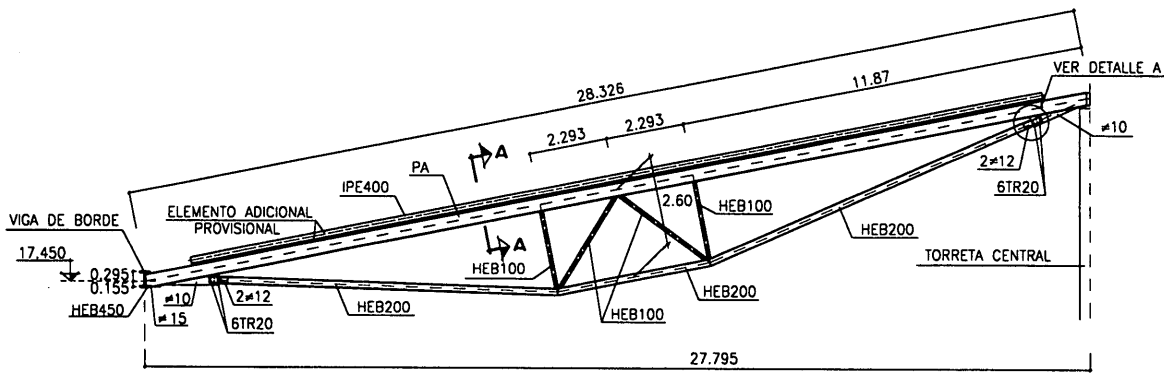
Para ello, ajustándose a los esfuerzos de flexión y corte existentes en los diferentes nudos, se adoptaron diversos tipos de uniones (fig. 13): estrictas; semicompletas y completas, manteniendo en las uniones estrictas exclusivamente las uniones soldadas a tope entre las alas de los perfiles, cuya ejecución puede llevarse a cabo de manera muy sencilla y garantizada, y con un mínimo grado de embridamiento, tratando de minimizar los efectos de coacciones parásitas entre elementos. En última instancia los procesos de distensionado de este tipo de uniones de ala son de gran sencillez y economía.

La decisión del perfil base a emplear fue adoptada por la condición de que el número máximo de las barras a reforzar en la cubierta fuera menor o igual al 1% del total de las mismas. Asimismo, el número de nudos con uniones diferentes de la tipo tampoco exceden de dicho porcentaje.

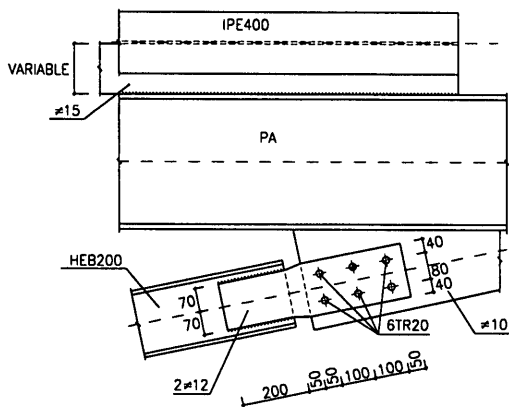
La unión tipo A estricta de las barras de los nudos consiste exclusivamente en el soldeo de las alas a tope, y el soldeo del alma en el borde horizontal inferior de su desmembrado, con el ala del perfil continuo, mediante cordones en ángulo de 4 mm.

Como uniones especiales se incluye la tipo B, también estricta pero con las soldaduras inferiores de 6 mm de espesor;

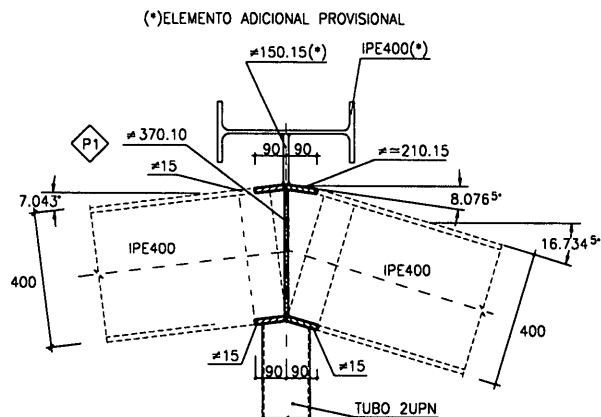
Figura 14. Detalles de pieza provisional para montaje.



CELOSIA PROVISIONAL



DETALLE A



SECCION A - A

la tipo C, semicompleta, con soldeo superior e inferior del alma con cordones de 6 mm y la D, completa, con uniones a tope de almas y alas.

Los perfiles que debieron reforzarse por flexión se localizan prácticamente en una de las esquinas inferiores.

Las aristas entre planos de cubierta se realizaron mediante vigas armadas de chapa, cuyas almas se dispusieron verticales y no en el plano bisectriz de las dos superficies que se intersectan, con el fin de poder llevar a cabo de forma favorable el montaje de la cubierta, como más adelante se detalla.

Las alas de estos perfiles se realizaron con disposiciones en uve asimétricas, para adaptarse, en uno y otro lado, a las alas de los perfiles de ambos planos de cubierta (figura 14). En el vértice central, un redondo $\varnothing 40$ vertical permite recoger las almas de los tres elementos de cumbrera o aristas de la cubierta, mientras que el cuarto de los elementos de la cruz en planta, al estar incluido en el plano inclinado largo de la cubierta, se presenta lógicamente inclinado respecto a la vertical.

Los apoyos de la estructura son elementos de neopreno-teflón libres, unideslizantes o fijos, según su posición, dispuestos de tal forma que no coarten los movimientos de origen tér-

mico, pero impidan los movimientos horizontales y resistan las acciones provocadas por el viento en cualquier dirección.

La flecha máxima teórica de la estructura en su centro, bajo la totalidad de las acciones características de la misma, es de 65 mm, equivalente a $L/711$ en dirección longitudinal y $L/456$ en dirección transversal; valores perfectamente apropiados para el tipo de cubierta y las características de su cobertura.

El proceso constructivo de la estructura presenta un planteamiento en parte convencional y en parte singular.

La parte convencional radica en el empleo de una torreta central para el apoyo provisional de los elementos principales de las piezas de arista de las cumbreras o limatesas, dispuestas en cruz en planta (fig. 15).

La parte singular consiste en la disposición provisional adoptada para estas piezas principales, que se integran como cordones superiores de unas celosías provisionales cuyos tirantes y montantes se constituyen mediante sencillos perfiles auxiliares (figuras 14 y 15). Asimismo, para garantizar la resistencia al pandeo transversal de estos elementos de gran longitud: 27.8 m, se situaron, en paralelo con los cordones superiores, perfiles IPE 400, del mismo tipo empleado para las barras

Figura 15. Torreta central de apeo y cumbreras con celosías provisionales de refuerzo.



de la cubierta, dispuestos en posición horizontal y vinculados longitudinalmente a dichos elementos de cumbrera.

Sobre estas piezas principales descritas se van disponiendo, en un orden apropiado, témpanos o trozos de los planos de cubierta ensamblados totalmente en taller y con un peso

apropiado para su montaje mediante la grúa torre de obra, ubicada en un punto interior de la cubierta (figuras 16 y 17).

Una vez alcanzada la resistencia y estabilidad suficiente de la cubierta formada por las piezas de cumbrera y el número apropiado de témpanos y elementos de los planos inclinados y verticales de la cubierta, se procede a la eliminación de los

Figuras 16 y 17. Dos fases de la colocación de témpanos de cubierta.

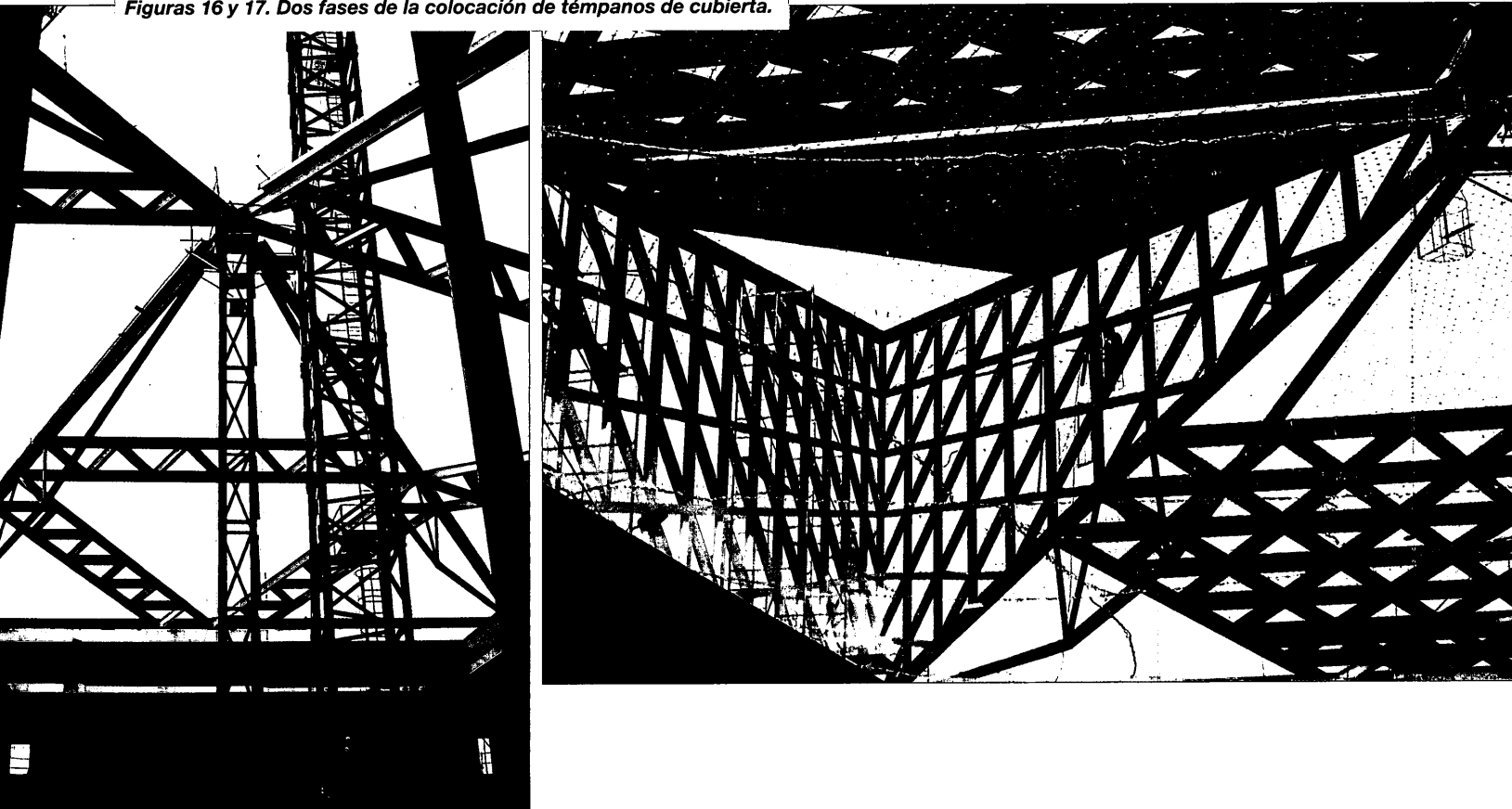




Figura 18. Cubierta terminada.

perfiles IPE 400 estabilizantes, los cuales se preparan para su reutilización en las barras de la estructura aún por colocar. Seguidamente se lleva a cabo la eliminación de los tirantes y montantes de las celosías auxiliares y, una vez completado el montaje y soldeo de todos los perfiles de la cubierta se procede al desapeo de la torreta central, que pone en carga la cubierta en su disposición final. La operación final corresponde al cierre del alveolo dejado para el paso de la grúa.

En la figura 18 se aprecia el estado final de la obra.

Las cuantías de acero tipo S255 (A42b) empleadas en la estructura fueron:

Perfiles HEB 450.....Borde inferior	26.266 kg.
Perfiles HEB 180.....Planos verticales	33.787 kg.
Perfiles IPE 400.....Planos inclinados	141.544 kg.

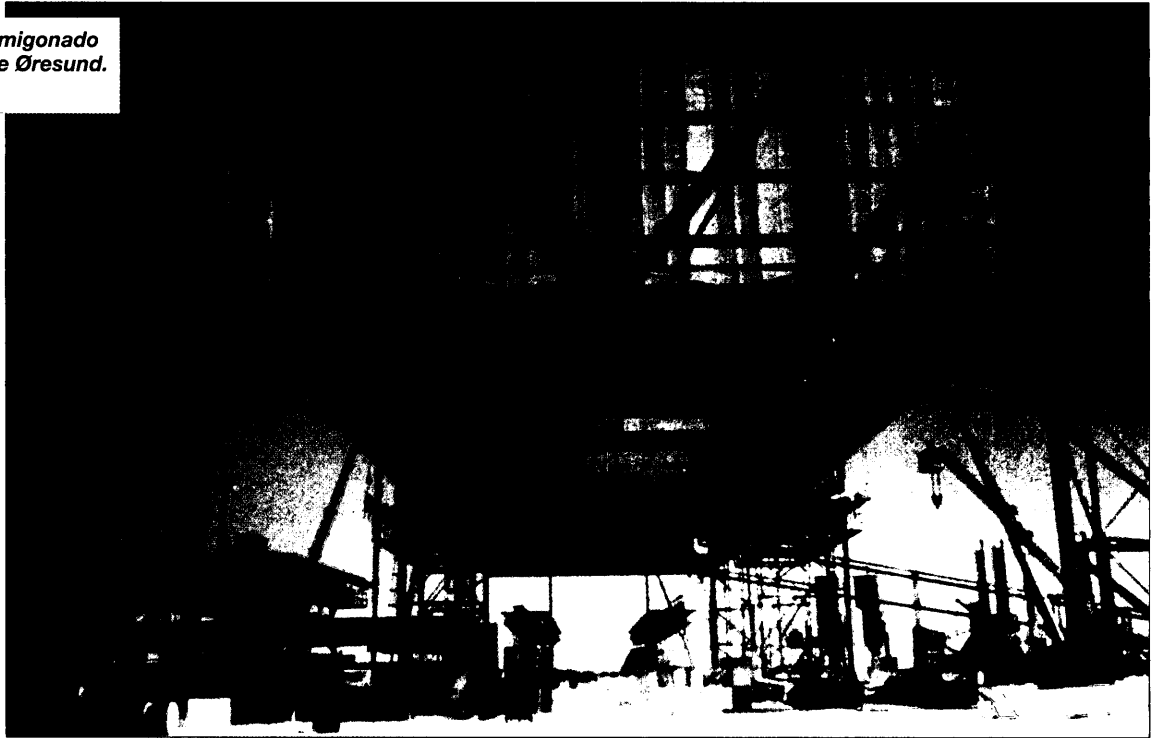
Con un total de 201.596 kg. equivalentes a 143,6 kg/m² de superficie en planta de la cubierta.

NAVE PARA LA REALIZACIÓN DE LOS TABLEROS DE LOS TRAMOS DEL PUENTE DE ØRESUND

Promotor y Constructor: Dragados y Construcciones

El tercer ejemplo que se presenta pertenece estrictamente a la que se ha denominado al comienzo como estructura ingenieril, cumpliendo los fuertes requisitos funcionales exigidos y con unas consideraciones muy sencillas de carácter estético. Su visión y apariencia pueden, para cada espectador, dar lugar a apreciaciones muy diversas acerca del valor estético que una

Figura 19. Nave para el hormigonado de los tramos del Puente de Øresund. Vista general.



construcción planteada y resuelta con arreglo a los condicionantes antedichos puede alcanzar y que, a juicio del que suscribe, no merece en absoluto respecto de las dos estructuras antes descritas, realizadas con criterios mucho más arquitectónicos de marcado carácter aparente.

La estructura de la cubierta responde a una serie de requisitos muy exigentes que se necesitaban para llevar a cabo en su interior el hormigonado sistemático

y de máxima calidad de las losas de los tableros de los grandes tramos mixtos de los accesos al puente del estrecho de Øresund que unirá Dinamarca y Suecia, y cuyas luces son de 120 m (7 vanos) y 140 m (42 vanos).

Estos 49 vanos de acceso deben ser realizados prácticamente en su totalidad en la factoría que la Empresa Dragados posee en Cádiz, y transportados después mediante barcas hasta su lugar definitivo de emplazamiento.

Entre los muchos elementos y construcciones auxiliares específicas necesarias para la realización de esta gran serie de inmensos elementos "prefabricados", se encontraba la necesidad de habilitar un espacio cubierto de grandes dimensiones que permitiera, con total facilidad, la entrada de las celosías de los tramos metálicos sobre los que debían ejecutarse las losas de hormigón de los tableros y la salida de los tramos mixtos completos terminados, para su traslado a las barcas de envío. Asimismo, debían poderse introducir y retirar los sistemas de encofrado interiores y de voladizos de las losas, efectuar la manipulación de los materiales de ferralla y, por supuesto, soportar la serie de puentes grúa y sistemas auxiliares de elementos de puesta en obra del hormigón: extendedoras, vibradores, tratamientos de acabado, etc. Finalmente, la nave debía incorporar todo el sistema de refrigeración requerido para la realización de cada losa en las condiciones de puesta en obra necesarias y con las condiciones de calidad y precisión requeridas.

Básicamente, se necesitaba la cobertura de una superficie rectangular de 150 x 32 m, totalmente libre de apoyos en sus bordes, limitándose la sustentación al apoyo en las cuatro esquinas, de forma de dejar pasar a través de sus lados

largos las celosías metálicas de los tramos del puente (lado Norte) y los tramos completos hormigonados (lado Sur); y los sistemas de moldes, encofrados, ferralla, etc., por los lados Este y Oeste.

La altura libre de los laterales de la nave debía ser de 15 m y por encima de la misma debía situarse un recinto cerrado de unos 10 m de altura en el que debían poder operar simultáneamente dos sistemas de puente grúa.

Uno, superior, de uso general capaz para 5 t útiles; y otro, inferior doble, constituido por un puente grúa de vibradores, equivalente a una capacidad útil de 1.5 t; en simultaneidad con un puente grúa repartidor de hormigón, con capacidad útil equivalente de 6 t y además un sistema de vagonetas móviles de reparto de hormigón capaces para 7.5 t en ambos bordes longitudinales.

Por encima y por fuera de este recinto se debía situar la estructura propiamente dicha de la cubierta de la nave y de la sustentación de los sistemas móviles.

El requisito fundamental que define el diseño de dicha cubierta radica, por tanto, en la necesidad de contar con un sistema de vigas carril y apoyos de los equipos móviles de la nave, dispuestos sobre sus lados longitudinales, pero cuyos bordes inferiores quedan sin apoyo y con unas determinadas condiciones de tolerancia, disposición geométrica y deformabilidad.

El sistema estructural consiste (figuras 20, 21 y 22) en una serie de pórticos rectos de celosía de 32 m de luz interior, separados 10 m entre sí. Los fustes de estos pórticos coinciden parcialmente en altura con los montantes verticales de dos grandes celosías de 150 m de luz, que se sitúan en los bordes

Figura 20. Perspectiva.

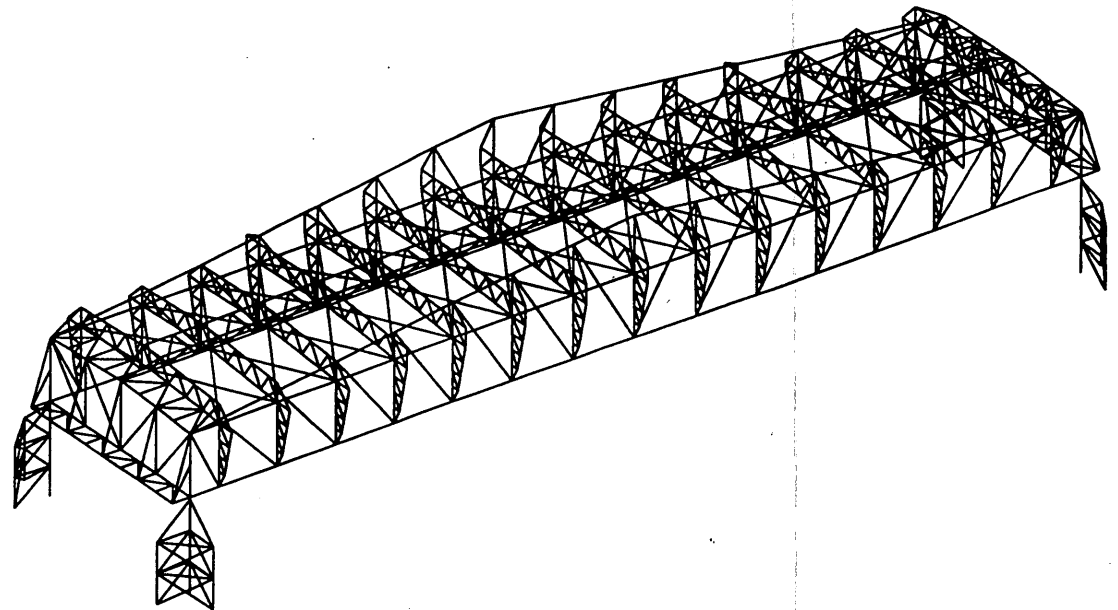


Figura 21. Planta y alzado.

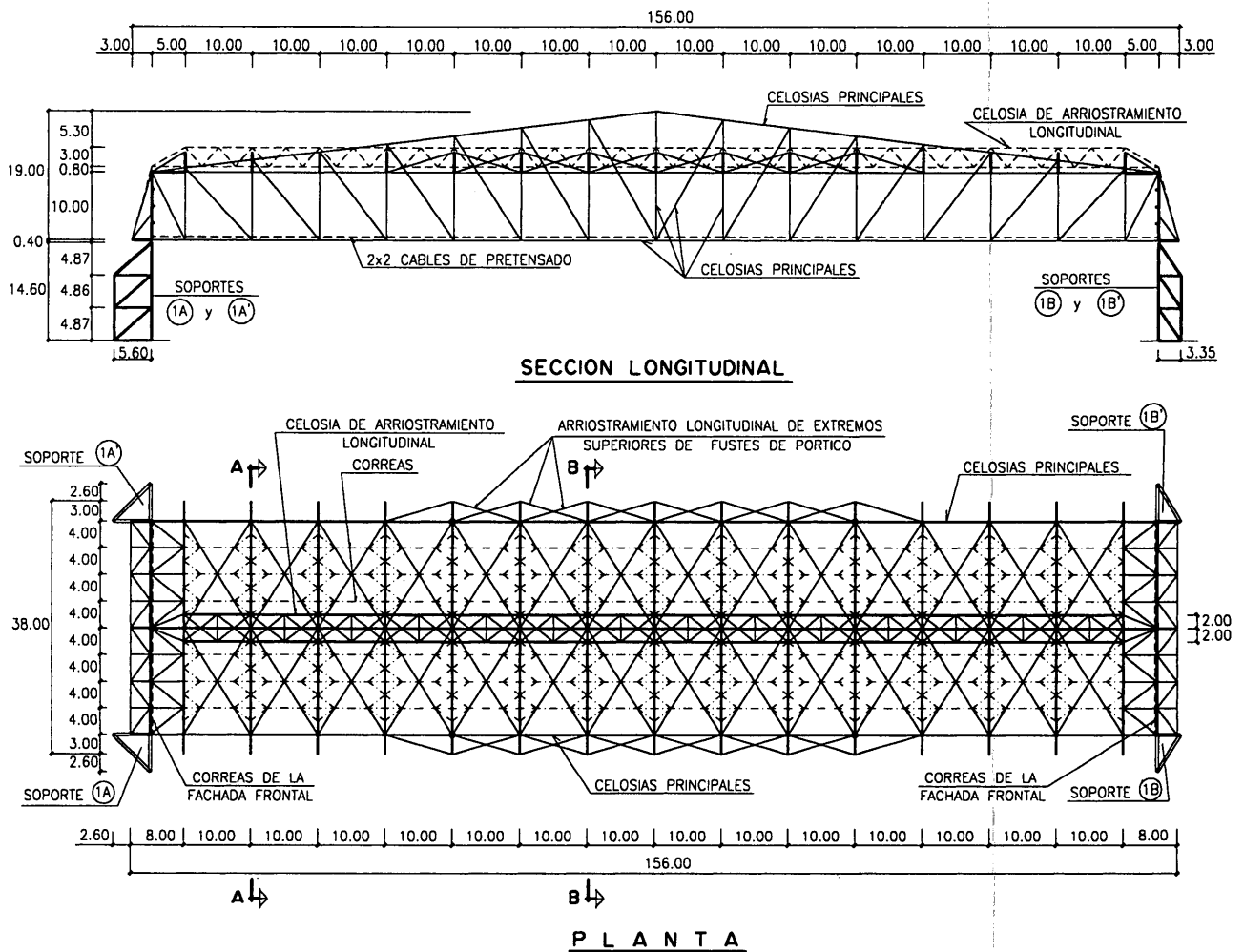


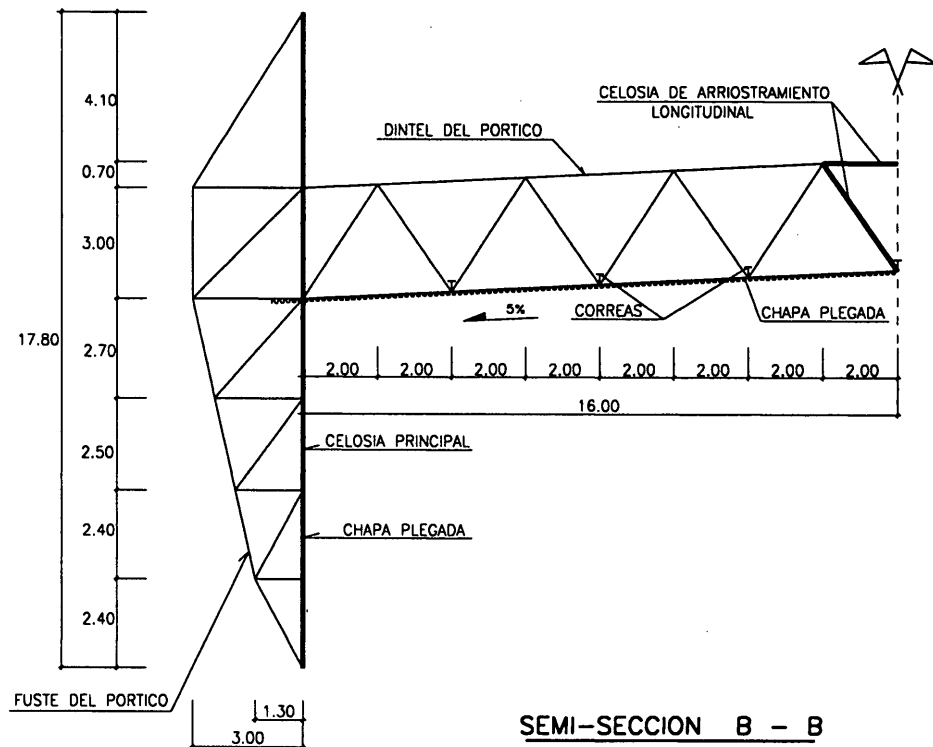
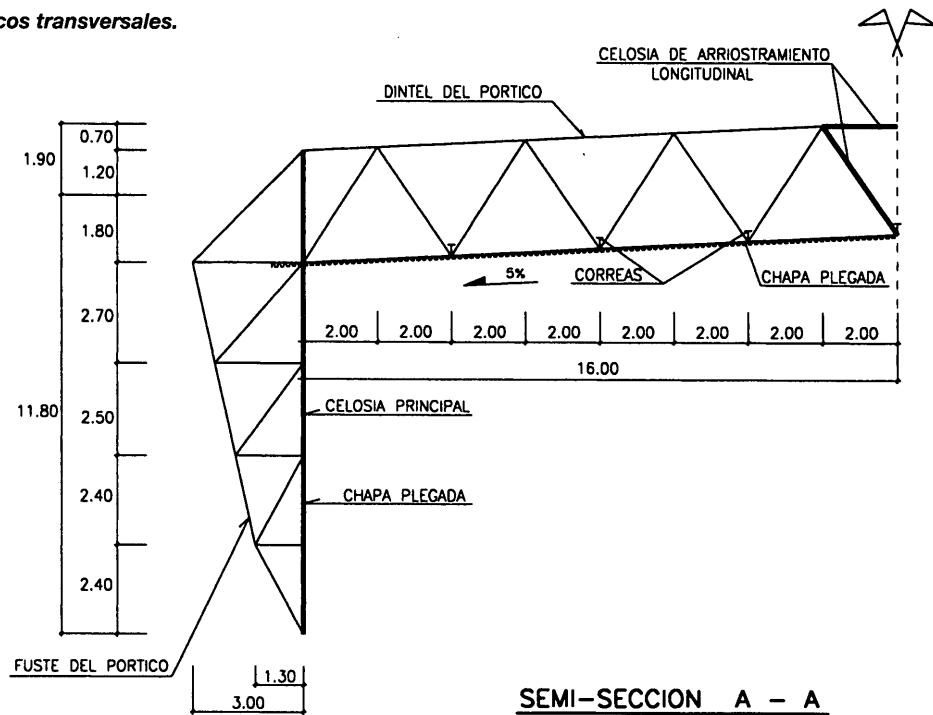
Figura 22. Montantes verticales y pórticos transversales.

longitudinales de la nave y constituyen los elementos resistentes fundamentales del sistema estructural global (figuras 21 y 22).

Los dinteles de los pórticos transversales citados conectan ambas celosías y son, además de los elementos base estabilizadores de las acciones del sistema de cargas móviles y de recogida del viento transversal, soportes del sistema de correas longitudinales que sustentan la cobertura del gran recinto de trabajo.

Los bordes inferiores de las correas y del sistema de pórticos transversales coinciden totalmente, de manera que permiten el posicionamiento continuo de la chapa plegada de cubierta suspendida de las correas y con sus valles orientados en la dirección transversal, lo cual da lugar al perfecto e inmediato desagüe de la cubierta al exterior, al estar dicho sistema dispuesto a dos aguas con una limatesa central longitudinal.

Los dinteles de los pórticos son celosías de tipo Warren, de 4 m de módulo y 3 m de canto, que reciben en sus nudos inferiores a las mencionadas correas. El arriostramiento de los cordones superiores de dichos dinteles en su dirección transversal (longitudinal de la nave), se lleva a cabo mediante una celosía de sección transversal



triangular que liga todas las parejas centrales de nudos superiores de los dinteles, hasta unirse en cada uno de los extremos de la nave con sendas celosías horizontales capaces de soportar y transferir a los soportes todo tipo de acciones horizontales longitudinales que el sistema pueda recibir o generar.

Las correas, de 10 m de luz, formadas por pequeños perfiles IPE 120, se completan con parejas de jabalcones tubulares dispuestos en V que unen los dos nudos del dintel del pórtico situados encima de las líneas de correas, a uno y otro lado de las mismas, unidos con los puntos situados a los cuartos de la luz de estas últimas, creando puntos de arriostramiento y suspensión que permiten reducir apreciablemente el peso de las correas y generar un cierto arriostramiento, muy flexible, de los cordones superiores de los pórticos, en los tramos situados entre los apoyos y la celosía longitudinal de arriostramiento antes citada. Aunque en el análisis de los dinteles de los pórticos no se tuvo en cuenta este efecto, ello supone una garantía extra de estabilidad entre subsistemas.

El conjunto de pórticos se completa con la disposición, en el plano inferior de los mismos, de un conjunto de diagonales en Cruz de San Andrés que, en cada uno de los dos planos de vertiente de la cubierta, da lugar a la formación de grandes celosías que forman el sistema resistente frente al viento transversal y lo transfieren a las celosías extremas dispuestas en los laterales de la nave, a manera de montantes de borde de los planos de la cubierta.

Los fustes de celosía de los citados pórticos transversales, fig. 22, además de recoger los esfuerzos de los sistemas móviles y del viento transversal permiten, mediante una prolongación por encima del borde superior de dichos dinteles, arriostrar flexiblemente el cordón superior de las celosías principales, como en el caso de un puente de tablero inferior, garantizando la estabilidad de conjunto de la gran estructura.

Todos los sistemas citados se completan en cada uno de los extremos cortos de la nave con un grupo de tres celosías de 32 m de luz y canto constante dispuestas en Z:

- ▼ Una superior, horizontal, ya indicada anteriormente.
- ▼ Otra vertical en el plano extremo, que equilibra y reparte las acciones horizontales entre los soportes de la nave, y arriostra a la anterior.
- ▼ Una tercera, horizontal, unida al cordón inferior de la anterior para su arriostramiento y que, a su vez, se mantiene en posición mediante ligeros tirantes que la unen con la primera de las celosías citadas.

La fijación y resistencia al viento de los faldones longitudinales de la nave se realiza mediante cuatro correas dispuestas en el borde superior y a los cuartos de la altura, así como con el tirante inferior de la gran celosía longitudinal. La tipología de estas correas es semejante a las de cubierta

pero con HEA 120 en vez de IPE 120 y presentan también jabalcones fuera de su plano, que se unen a las celosías de los fustes de los pórticos para arriostrarlas.

El sistema global de la cubierta se apoya en sus esquinas en cuatro grandes soportes de celosía espacial y planta triangular rectangular, capaces de resistir las acciones verticales y las flexiones en ambos planos principales provocados por las correspondientes acciones longitudinales y transversales: viento, térmico, etc.

La disposición de los aparatos de apoyo entre cubierta y columnas corresponde al tipo de articulación fija en dos esquinas de un lado corto y articulación deslizante longitudinal en las otras dos. De esta manera, aunque se incorporan acciones térmicas por la coacción transversal que las columnas imponen, se logra un reparto homogéneo sobre estas cuatro piezas de las importantes solicitaciones debidas al viento transversal.

Aunque el sistema de nivelación de acabado de las losas de hormigón de los tramos de puente se controla exteriormente, como alternativa, para casos especiales, se cuenta con uno de los puentes grúa. En este caso, las exigencias de flechas son muy penalizantes e impondrían al sistema en conjunto unas condiciones desproporcionadas. Para poder mantener el sistema en sus valores resistentes estrictos, se incorporaron dos soportes abatibles, situados bajo los cordones inferiores de cada una de las celosías principales, con sus vértices superiores, rotulados, coincidentes aproximadamente con los tercios de la luz, para su eventual empleo en los casos necesarios.

Un aspecto notable de la estructura consiste en el empleo del pretensado de las grandes celosías principales, mediante la inclusión en el interior de cada uno de los cordones tubulares inferiores, formados por 2 IPE400, de dos cables de 6 ϕ 0.6" (A 160/180) tesados a 107.4 t por cable. Dicho pretensado, debido a la importancia de los esfuerzos de peso propio en el conjunto, permite aprovechar las siguientes condiciones favorables:

1. Reducción del peso de acero estructural.
2. Menor coste, por la ventajosa relación resistencia unitaria/coste kg, del acero de pretensar respecto al estructural.

El análisis general de la estructura se completó con un estudio no lineal para detectar cualquier posible respuesta de inestabilidad local, parcial o general de los subsistemas involucrados. El análisis no lineal arrojó para los nudos críticos de la estructura los movimientos que se indican en el cuadro siguiente, con incrementos máximos del orden del 10% en los desplazamientos horizontales transversales (con valores absolutos muy reducidos) y del 2.5% en los verticales; que se traducían en una variación del orden del 1.5% de los esfuerzos axiales máximos de las piezas, perfecta-

Cuadro 1

	Movimiento (cm)				Movimiento (cm)			
	Nudo	u_x	u_y	v_z	Nudo	u_x	u_y	v_s
Lineal		4.180	-11.688	-58.533		3.289	-8.885	-37.905
No lineal	180	4.548	-10.753	-59.721	680	3.649	-8.340	-38.814
Variación		0.368	0.937	-1.188		0.360	0.545	-0.909
%		8.8	8.0	2.03		10.94	6.1	2.40

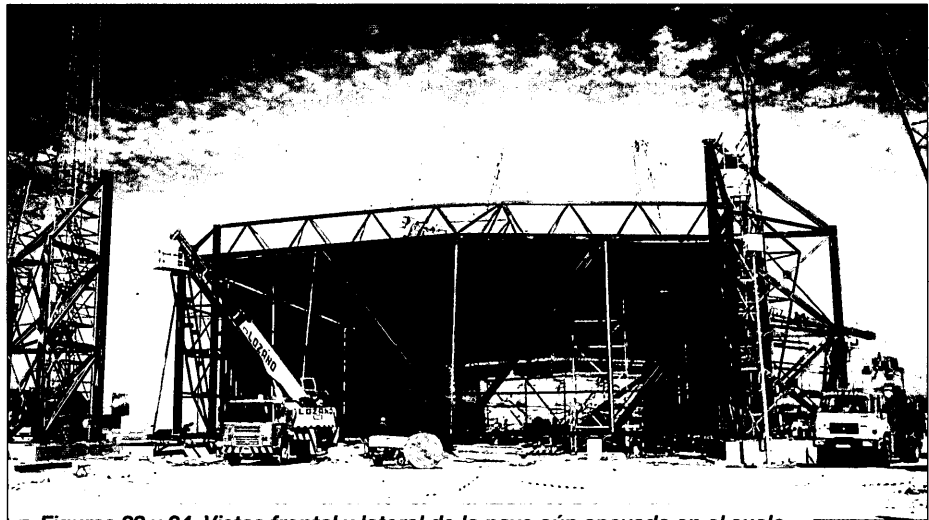
mente asumibles por los coeficientes de seguridad previstos. (Cuadro 1).

El proceso constructivo se basó en el ensamblaje a nivel del suelo de la totalidad de la estructura de la nave, apoyándola sobre elementos verticales cortos apropiadamente situados bajo los nudos de las celosías principales y en los que se introducían las contraflechas de ejecución previstas por el análisis (figuras 23 y 24). El conjunto se situaba ligeramente desplazado de su posición final en planta, para poder llevar a cabo en paralelo la construcción completa, y la colocación de los aparatos de apoyo en tres de los cuatro soportes en los que se apoya la nave. Del cuarto soporte, al estar su espacio ocupado por la nave en construcción, solamente se construía la cimentación y los pernos de anclaje, quedando situada la parte metálica terminada de dicho soporte en un punto próximo a su cimentación, pero fuera de la zona ocupada por la nave durante su ensamblaje a ras del suelo.

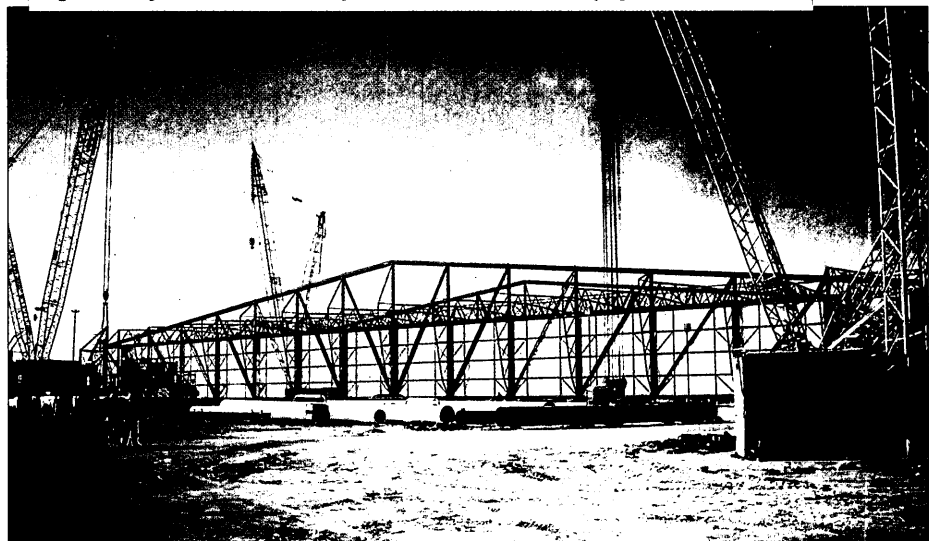
Una vez completada la estructura metálica, y realizados en gran parte los cerramientos previstos, se procedió a realizar un desapeo parcial de la nave, que equivalía a aplicar el 50% del peso de la misma a la estructura; aproximadamente una flecha de 14 cm en el centro. En dicho momento se procedió a efectuar el tesado de las cuatro unidades 6 ϕ 0.6" albergadas en los tirantes inferiores; operación que equivalía a transferir otro 40% del peso de la nave a la estructura principal.

Una vez sellados los anclajes y colocadas las protecciones de los mismos, se procedió al desapeo final, lo que equivalía a introducir el 10% restante del peso del sistema sobre la estructura resistente.

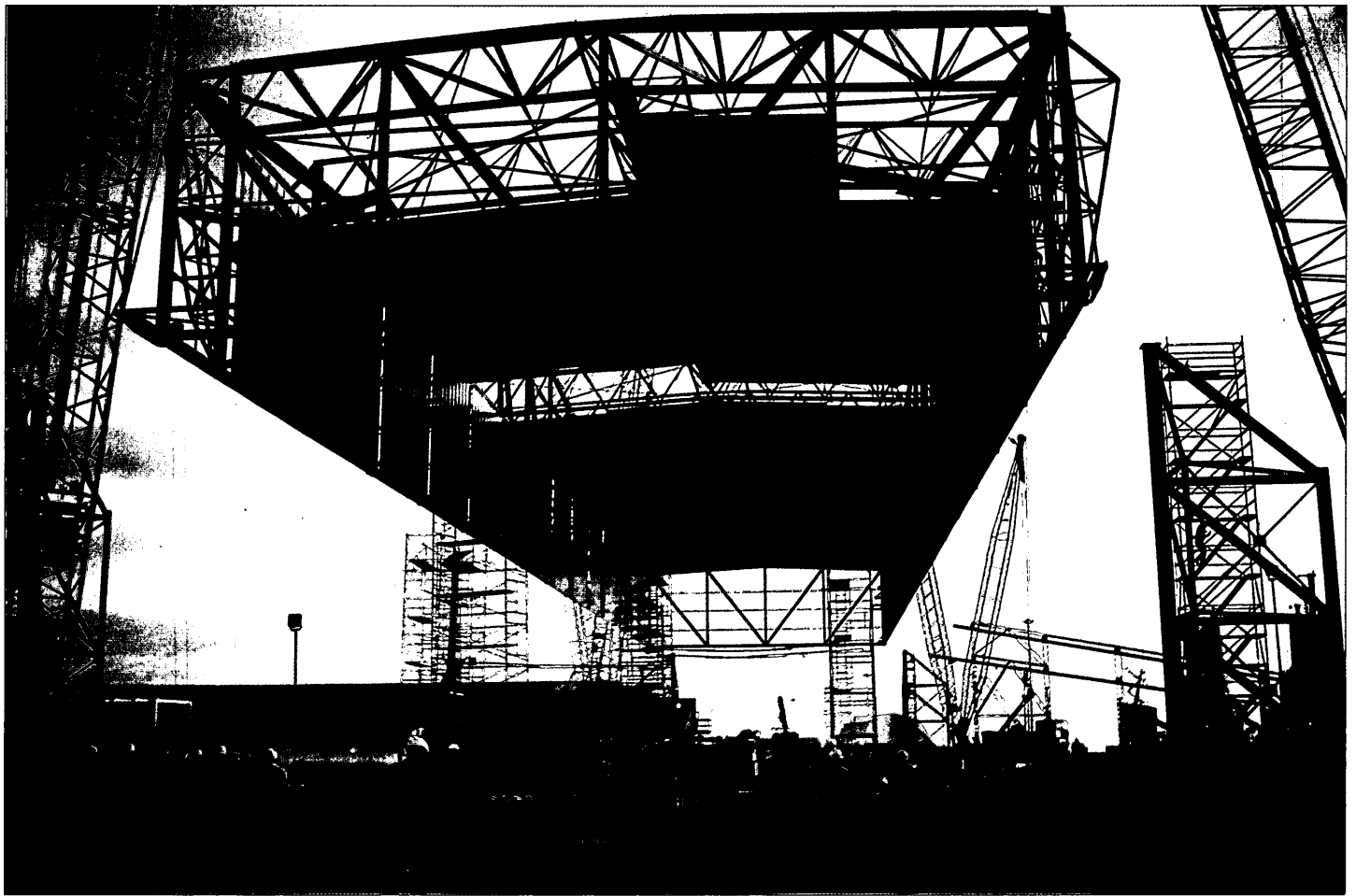
A partir de ese momento se llevó a cabo una maniobra de elevación completa de la estructura y los cerramientos coloca-



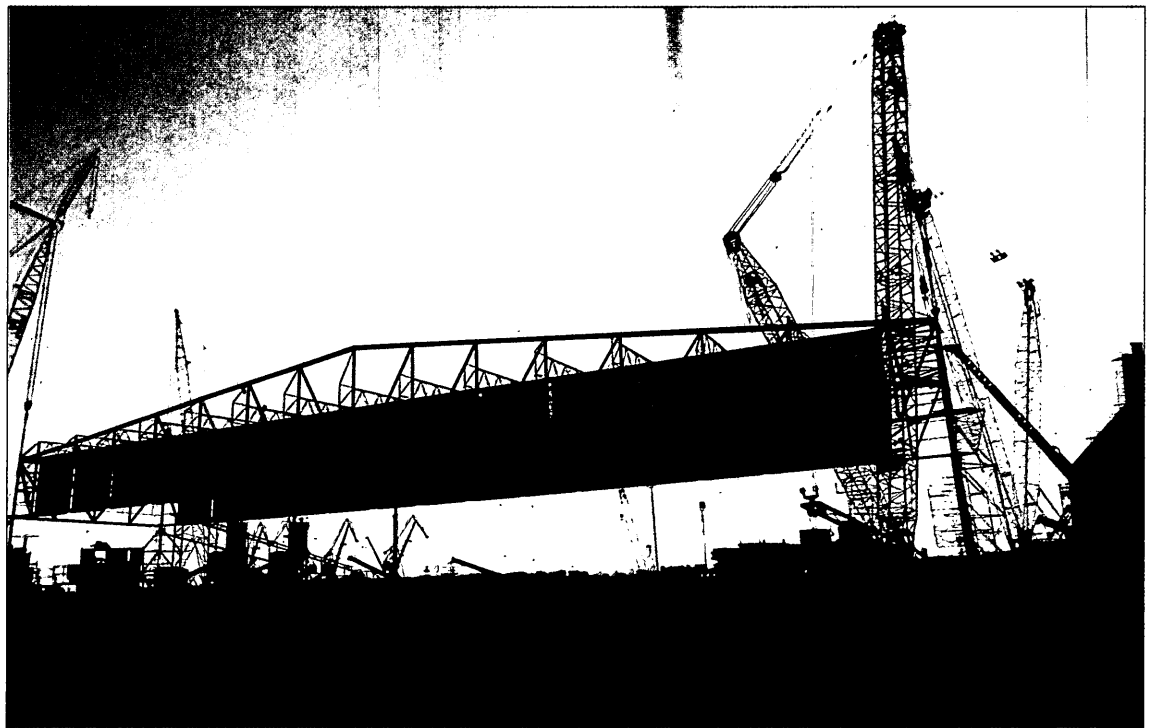
Figuras 23 y 24. Vistas frontal y lateral de la nave aún apoyada en el suelo.



dos, con un peso total de 650 t, mediante cuatro grúas ubicadas en las esquinas de la nave: 2 Manitowoc 4100 con ringer, una Manitowoc 7000 y una Demag CC2600; con un control de elevación entre las mismas para no provocar diferencias de alturas superiores al margen previsto, aunque la flexibilidad de la nave permitía movimientos diferenciales apreciables sin provocar estados tensionales importantes (figuras 25 y 26).



Figuras 25 y 26. Final de la elevación, antes de situar el cuarto soporte.



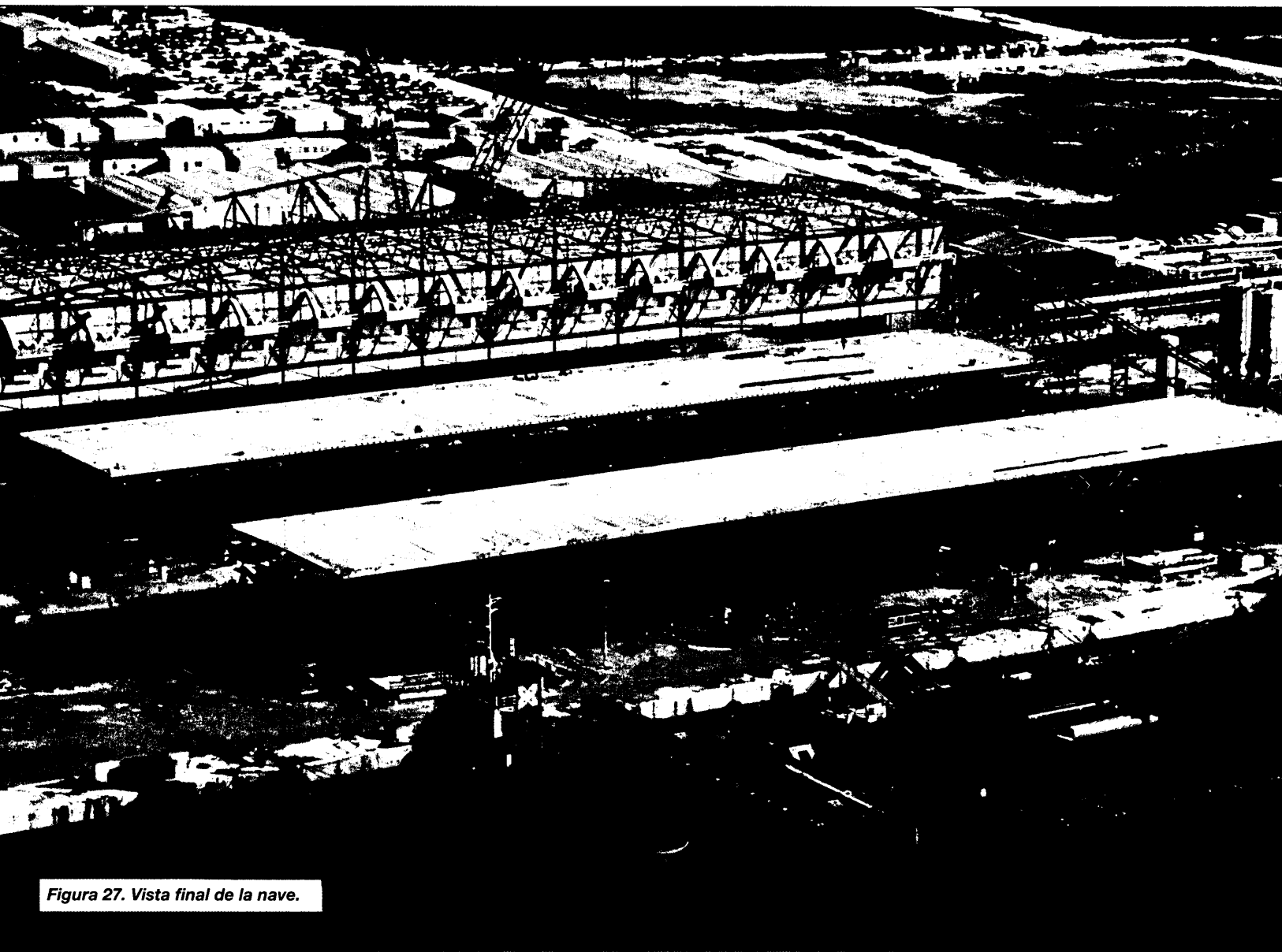


Figura 27. Vista final de la nave.

Una vez situada la pieza a 16 m de altura sobre el suelo, una quinta grúa auxiliar situó el cuarto soporte en su posición definitiva, llevándose a cabo de inmediato la apretadura de los anclajes de su base. Acto seguido, se hizo descender lentamente a la cubierta de la nave hasta su apoyo y posterior fijación en los soportes, en la forma prevista, quedando completa la estructura.

Posteriormente se efectuó la colocación de los carriles de rodadura de los puentes grúas, el cierre de la pequeña parte no completada antes de la elevación y la colocación de los sistemas de acondicionamiento de aire y resto de equipos auxiliares.

En la figura 27 se muestra la nave terminada en funcionamiento.

Las cuantías de materiales empleados fueron:

Acero S 355 en estructura	630,60 t.=131,40 kg/m ²
Acero de pretensar (A 160/180)	3,92 t.=0,82 kg/m ²
Acero estructural en vigas carril y sus apoyos	130,00 t.=27,10 kg/m ²
Chapa plegada de cerramiento	78,70 t.=16,40 kg/m ²

En la realización de estos proyectos ha participado de forma muy activa Juan Jesús Álvarez, Ingeniero de Caminos, de MC-2; y en la Cubierta de Cádiz Mauro E. Giuliani, Ingeniero de Caminos e Ingeniero Civil italiano, de MC-2; así como Francisco Quintero, Dr. Ingeniero de Caminos, de Dragados y Construcciones. ●