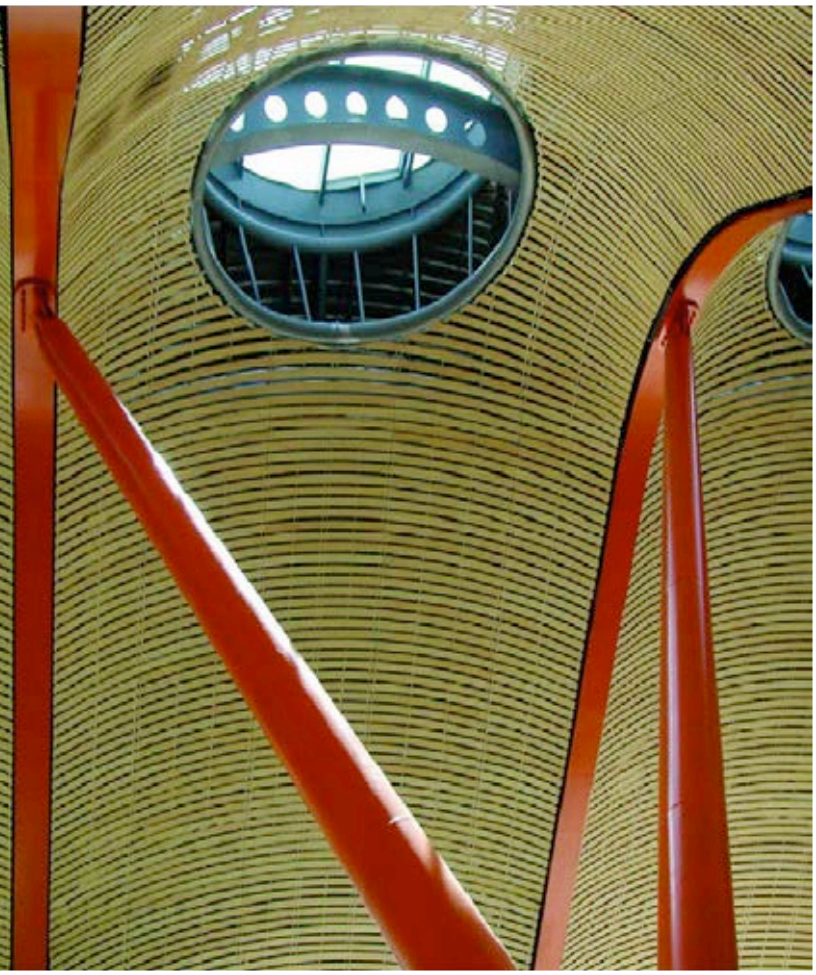
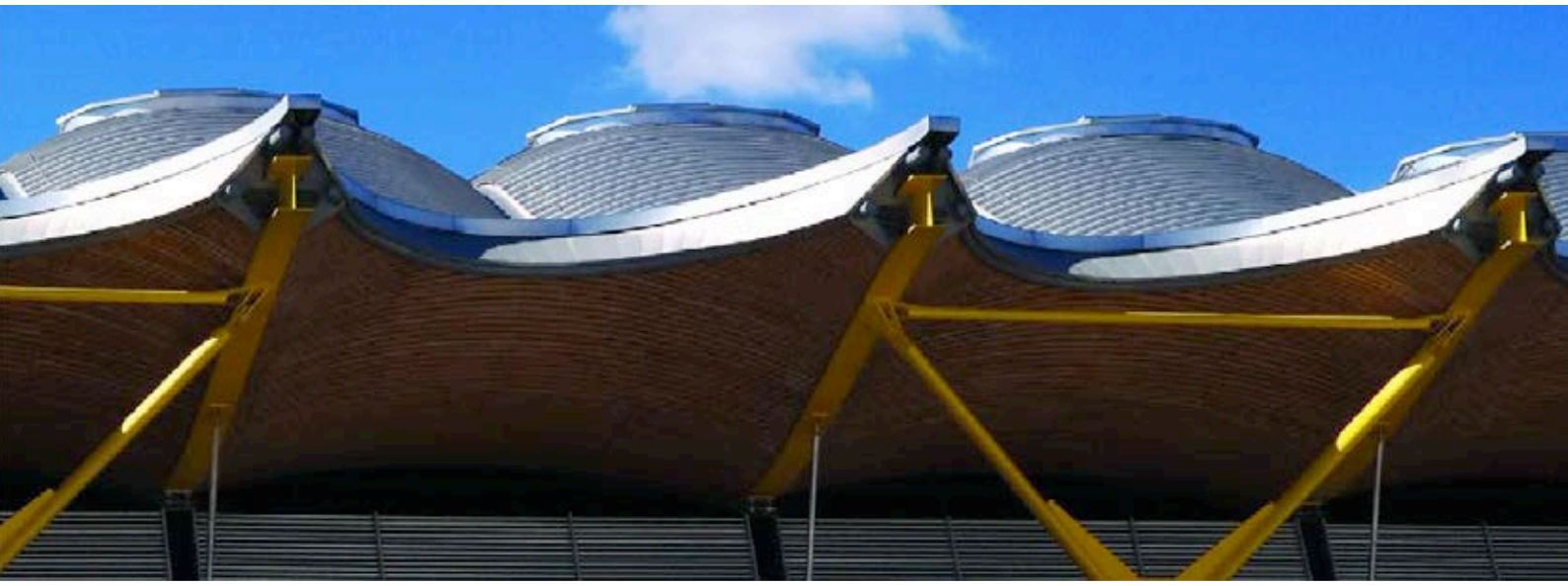
HORMIGÓN y acero

nº 239

Primer trimestre de 2006





Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural

http://www.e-ache.net

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

ASOCIACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

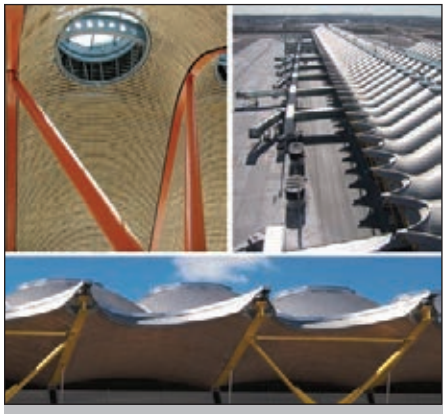


Foto de portada: Aeropuerto Madrid/Barajas. Cubierta edificios Terminal y Satélite.

EDITAN:

ache

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (C.S.I.C.)

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

DIRECTOR:
Luis Mª Ortega Basagoiti

VOCALES:
Pilar Alaejos Gutiérrez
Juan Luis Alcalá Sánchez
José Mª Arrieta Torrealba
Miguel Ángel Astiz Suárez
Jaime Fernández Gómez
Jaime C. Gálvez Ruiz
Jesús Gómez Hermoso
David Izquierdo López
José Antonio Llombart Jaques
Francisco Morán Cabré
Antonia Pacios Álvarez
Santiago Pérez-Fadón Martínez
Javier Ripoll García-Mansilla
Jesús Rodríguez Santiago
Julio Vaquero García
José Mª de Villar Luengo

ASESORES:
Antonio Aguado de Cea
Ángel Aparicio Bengoechea
Juan Carlos Arroyo Portero
Alex Barbat Barbat
Manuel Burón Maestro
Pilar Crespo Rodríguez
Ramón del Cuvillo Jiménez
David Fernández Ordóñez
Enrique González Valle
Javier León González
Rafael López Palanco
Antonio Marí Bernat
Julio Martínez Calzón
Francisco Millanes Mato
Carlos Siegrist Fernández

SECRETARIO:
Jaime Peribáñez Sebastián

La Asociación, una de cuyas finalidades es divulgar los trabajos de investigación sobre la construcción y sus materiales, no se hace responsable del contenido de ningún artículo y el hecho de que patrocine su difusión no implica, en modo alguno, conformidad con la tesis expuesta.

De acuerdo con las disposiciones vigentes, deberá mencionarse el nombre de esta Revista en toda reproducción de los trabajos insertos en la misma.

Hormigón y Acero:
E.T.S.I Caminos, Canales y Puertos
Avda. Profesor Aranguren, s/n
Ciudad Universitaria
28040 Madrid
Tel.: 91 336 66 98 - Fax: 91 336 67 02

Depósito Legal: M-853-1958
ISSN: 0439-5689
Diseño: María del Pozo
Imprime: Invoprint, S.L

HORMIGÓN y acero

Índice

NÚMERO MONOGRÁFICO DEDICADO A LA NUEVA ÁREA TERMINAL DEL AEROPUERTO DE BARAJAS

Carta de Presidente 3
Presentación 6

REALIZACIONES

Planteamiento aeroportuario de la nueva Área Terminal 7-13
Airport guidelines for the new Terminal Area
J.M. Hesse Martín

Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal 15-30
Architectural concepts of the new Terminal Area
C. Lamela y P. Moya

Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal 31-58
Conceptual design, construction project and technical assistance for the concrete works of the buildings and infrastructures of the new Terminal Area
H. Corres Peiretti, J. Romo Martín, A. Pérez Caldentey y E. Romero Rey

Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal 59-68
Parking and access to the new Terminal Area
J.P. Fernel Fernández

Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal 71-84
Steel structure and prestressed façade of the new Terminal Area
L. Viñuela Rueda y J. Martínez Salcedo

Relación entre el proyecto, la ingeniería de detalle de construcción y la ejecución de nuevo Edificio Terminal 85-100
Project, engineering construction detail and work relationship in new Terminal Building
J. Gómez Hermoso

Tesado multipunto de la fachada del Edificio Terminal 101-108
Multipoint prestressing of the Terminal Building façade
J.M. Peña Pascual

Pretensado en las vigas de hormigón estructural 109-113
Prestressing of structural concrete beams
J.M. Illescas Villa y R. Sánchez de Pablo Muela

Sistema de Calidad y su aplicación en la ejecución de la estructura del nuevo Edificio Terminal 115-127
System of Quality and their application in the execution of the structure of the new Terminal Building
A. Hontoria Asenjo

Nuevo Edificio Terminal. Singularidades, incidencias y soluciones en la ejecución de la obra 129-141
New Terminal Building. Singularities, incidences and solutions in construction
J. Gómez Hermoso, M. Gutiérrez Bueno y A. Moreno Puertollano

Edificio Satélite de la nueva Área Terminal 143-148
Satellite Building at the new Terminal Area
J.P. Fernel Fernández

Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite 149-157
Roof and façade steel structures of the Satellite Building
J.M. González Barcina y P. Bernal Sahún

RINCÓN DE ACHE

Comprobación de un tablero mixto 159-160
Estudio del comportamiento a flexión y cortante de puentes de dovelas de hormigón con pretensado exterior y junta seca 161-163

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Renovación del Consejo Directivo

Queridos miembros de ACHE; queridos amigos,

El motivo de ocupar esta primera página de nuestra revista Hormigón y Acero, es informaros de la renovación que se ha producido en el Consejo directivo, tras las elecciones realizadas en el último Congreso celebrado en Zaragoza. Como ya sabéis, de acuerdo con nuestros Estatutos, la renovación es parcial y han permanecido como Consejeros Javier Asencio, José Manuel Gálligo, Juan Carlos López Agüi, Julio Martínez Calzón y Fernando Rodríguez, a los que nos hemos incorporado José Mª Arrieta, Jaime Fernández, Santiago Pérez-Fadón, José Romo, Luis Miguel Viartola y yo mismo.

Quiero en primer lugar, en nombre de los Consejeros electos y en el mío propio, agradeceros el apoyo recibido en las elecciones, apoyo que nos ha proporcionado el honor de integrarnos en el Consejo directivo y, en segundo lugar, significar el alto grado de participación en el proceso electoral, el mayor de todas las elecciones celebradas hasta ahora, lo que es muestra de la salud de nuestra Asociación y del interés despertado entre sus miembros.

A mis compañeros del Consejo les agradezco la confianza que me han mostrado al elegirme Presidente. A ellos y a todos vosotros espero no defraudaros.

Aunque es demasiado pronto para concretar nuevas metas y objetivos para el próximo trienio, estamos de acuerdo en fijarnos a corto plazo unas actuaciones consistentes en:

- Proseguir y reforzar la política de expansión de ACHE en Hispanoamérica.
- Acercar la Asociación al alcance de los jóvenes, dándosela a conocer y facilitando su incorporación
- Potenciar la página WEB, como escaparate de ACHE y nexo de unión con sus asociados.
- Apoyar la revista Hormigón y Acero, asegurando su periodicidad y ampliando su difusión.
- Extender y modernizar la base de datos de la Asociación facilitando el acceso a ella y su explotación.

En este momento en que se empieza a hacer balance de la vida profesional, recuerdo mis primeros contactos con ATEP en los años 75 en tierras Canarias. Aquel congreso me enganchó no sólo en el aspecto técnico sino por el sano ambiente y por la calidad humana de los asistentes. Desde entonces ATEP y posteriormente ACHE han sido mi Asociación y mi foro, donde he participado activamente en trabajos y donde he aprendido que contribuir desinteresadamente a mejorar la sociedad en que vivimos es, y debe seguir siendo, nuestra meta.

Finalmente quiero expresar el reconocimiento, de todos los que integramos el nuevo Consejo, a la fenomenal labor desarrollada por los Consejeros salientes, Ángel Carlos Aparicio, José Calavera, Enrique González Valle, Florencio J. del Pozo y José Antonio Torroja, y muy especialmente a nuestro anterior Presidente Hugo Corres cuyo mandato, aunque breve, considero que ha sido muy fructífero, consolidando la asociación en todos los aspectos. Gracias a su dedicación y buen trabajo recibimos una Asociación pujante. Nuestra misión será mantenerla y si es posible engrandecerla.

Termino con una pregunta que resume mi estado de ánimo al iniciar esta nueva singladura: ¿Qué más se puede pedir si tus compañeros te eligen para presidir tu Asociación?

José Mª de Villar
Presidente de ACHE

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Monográfico dedicado a la nueva Área Terminal del Aeropuerto de Barajas

Uno de los objetivos de la revista Hormigón y Acero, quizá el principal, es presentar a la comunidad técnica y científica las realizaciones, las investigaciones y los avances que se producen en el campo de las estructuras de la ingeniería civil y la edificación. Todos ellos se producen con frecuencia en realizaciones aisladas, con una mayor o menor repercusión técnica o económica. Además, en algunas ocasiones, se desarrollan grandes obras, de singular importancia, concentradas en el espacio y en el tiempo. En esta ocasión nos encontramos ante una de ellas. La ampliación del Aeropuerto de Madrid-Barajas ha supuesto todo un reto tecnológico y de inversión, que justifica que, por segunda vez en su historia, nuestra revista centre su atención, de forma monográfica, en una sola obra.

Esta ampliación del aeropuerto está integrada por tres edificios (Aparcamientos y nuevos Edificios Terminal y Satélite), dos pistas, plataformas de movimiento de aeronaves, centros de generación de energía y el nuevo Centro de Gestión Aeroportuaria, además de toda la infraestructura de conexión entre aquéllos y autovías de acceso y salida de los mismos.

Este número monográfico de la revista se ha centrado básicamente en los tres edificios citados, lo que se ha dado en llamar la "Nueva Área Terminal" del aeropuerto. Como sucedió en el primer monográfico de Hormigón y Acero centrado en una obra, este número se edita en su totalidad en color, gracias al patrocinio de las seis empresas constructoras involucradas en la materialización de esos tres edificios (ACCIONA Infraestructuras, DRAGADOS, FCC Construcción, FERROVIAL-AGROMÁN, OHL y SACYR).

En primer lugar se realiza una presentación del Plan Barajas con sus planteamientos y objetivos, continuando con una descripción del desarrollo arquitectónico, detallando los criterios tenidos en cuenta en el proyecto de esa nueva Área Terminal y el diseño llevado a cabo a partir de los mismos.

A continuación se describen los desarrollos de los proyectos de las estructuras de hormigón de los tres edificios, para luego pasar a detallar aspectos más o menos específicos de cada uno de ellos.

Así, se comentan primero las peculiaridades de los Aparcamientos, destacando sus características básicas y determinados elementos constructivos, como la cubierta ecológica, que simboliza un planteamiento de inquietud medioambiental que ha estado presente permanentemente en todo el proceso de esta obra.

Posteriormente, se incluyen varios artículos centrados en el nuevo Edificio Terminal que presentan las estructuras metálicas que constituyen la cubierta y las fachadas tensadas del mismo, la relación existente entre el Proyecto, la Ingeniería de Detalle de Construcción y la Ejecución de dicho Edificio Terminal, así como diversos aspectos relativos a su Ejecución y al Sistema de Calidad establecido y seguido en el mismo. Se incluyen también artículos específicos sobre los sistemas de tesado tanto de las mencionadas fachadas como de las vigas de hormigón estructural.

Finalmente, en sendos artículos, se describen los elementos de Proyecto y Construcción del Edificio Satélite y determinados detalles de las estructuras metálicas de cubierta y fachadas del mismo, homólogas a las del Edificio Terminal.

Confiamos en que el esfuerzo llevado a cabo por la Propiedad, los Proyectistas y los Constructores durante las fases de Planificación, Proyecto y Ejecución de esta obra y ahora por los autores de los artículos y el propio Comité de Redacción de la revista, permitan a todos compartir una experiencia que pueda aportarnos interesantes conocimientos para futuras realizaciones.

Luis Mª Ortega Basagoiti
Jesús Gómez Hermoso
(Coordinadores de este número monográfico)

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Planteamiento aeroportuario de la nueva Área Terminal

Airport guidelines for the new Terminal Area

José Manuel Hesse Martín
Ingeniero Aeronáutico
Director del Plan Barajas Aena

RESUMEN

Se presenta en este artículo una panorámica general, desde el punto de vista aeroportuario, de la ampliación del aeropuerto de Madrid-Barajas.

Tras una introducción sobre el papel del aeropuerto de Barajas en el tráfico aéreo, tanto europeo como hacia América, se comentan las referencias básicas de la ampliación acometida y se describen, en líneas generales, los elementos fundamentales que integran esta ampliación desde el punto de vista de funcionamiento aeroportuario. Por un lado se presentan los tres edificios básicos que integran la ampliación (Aparcamiento y dársenas, edificio Terminal y edificio Satélite) y por otro determinados elementos básicos para el funcionamiento del propio aeropuerto como el APM (Automatic People Mover), el Sistema Automatizado de Tratamiento de Equipajes (SATE) y el Centro de Gestión Aeroportuaria (CGA).

Palabras clave: Aeropuerto, Madrid-Barajas, ampliación, terminal.

1. INTRODUCCIÓN

Las consecuencias derivadas de la amenaza terrorista, añadidas a la crisis económica y, más recientemente, al encarecimiento del precio del petróleo, han supuesto un severo impacto para el transporte aéreo mundial, que se ha traducido en descensos o, como mínimo, estancamientos en el crecimiento del tráfico aéreo, lo que ha ocasionado en los últimos años serias dificultades económicas para compañías aéreas, fabricantes de aeronaves y gestores aeroportuarios y de navegación aérea, dificultades de las que empezaron a recuperarse desde el año 2004.

En el caso del aeropuerto de Madrid/Barajas, esta situación no ha dado lugar a una pérdida significativa de tráfico, observándose (Tabla 1) que en los últimos 10 años se han producido crecimientos anuales muy elevados, superiores al 10% en algunos casos, manteniéndose unas favorables expectativas de crecimiento a largo plazo, que serán posibles gracias a la entrada en servicio de las nuevas infraestructuras definidas en el Plan Director aprobado en 1999 y que permitirán alcanzar el objetivo, al que hoy en día no puede aspirar

SUMMARY

This article presents a general overview of the extension to Madrid-Barajas airport, from an airport standpoint.

After an introduction on the Barajas airport's role in air traffic, both European and to America, the basic references of the extension undertaken and, along general lines, the basic elements making up this extension are discussed from an airport's operating viewpoint. On the one hand, the three basic buildings forming the extension (Parking and set down/pick up areas, Terminal building and Satellite building) are presented and, on the other, certain basic elements for the working of the airport itself such as the APM (Automatic People Mover), the Automated Baggage Handling System (ABHS) and the Airport Management Centre (AMC).

Key words: *Airport, Madrid-Barajas, extension, terminal.*

1. INTRODUCTION

The consequences deriving from the terrorist threat added to the economic

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

crisis and, more recently, the rise in the price of oil, have meant a severe impact on world air transport which saw drops or, at least, stagnation in the growth of air traffic causing serious financial difficulties to airlines, aircraft makers and airport and air navigation managers over the last few years, who began recovering as from the year 2004.

In the case of Madrid/Barajas airport, this situation did not lead to a significant loss of traffic and it can be seen (Table 1) that very high annual growths have occurred, more than 10% in some cases, over the last 10 years whilst favourable long term growth expectations were maintained and will be possible due to the commissioning of the new infrastructures as defined in the Master Plan approved in 1999. These infrastructures will enable an aim to which no other large European airport can aspire, i.e., to double the current capacity of passenger, aircraft and cargo handling.

With the work which concluded in 2005 and which entered service at the beginning of 2006, Madrid/Barajas can handle up to 70 million passengers a year in its Terminal Buildings (the old T1, T2 and T3 and the new T4) and 600,000 operations/year in its flight field thanks to its 4 Runways, parallel 2 by 2, allowing for 120 operations an hour between landings and take-offs.

Madrid/Barajas airport has been extended with a clear aim in mind, to continue progressing in its role as a hub, flight connector and distributor (Figure 1), both in flights within the Spanish airport system and with transatlantic flights, playing the natural "entry gateway" role between Europe and America.

This will to act as an outbound airport for European traffic to Central, South and North America and an inbound airport for that same traffic to Europe is on what the Business Plan rests, justifying the heavy investment made for extending the facilities, guaranteeing to achieve the figure of 70 million passengers between 2015 and 2020, of whom 50% will be passengers using the airport's facilities just to change planes.

2. BASIC APPROACH TO THE AIRPORT EXTENSION

The main references for the Madrid/Barajas airport extension are summarised in Table 2.

ningún otro gran aeropuerto europeo, de doblar la capacidad actual de tratamiento de pasajeros, aeronaves y carga.

Con las obras que se han concluido en el 2005 y que han entrado en servicio a principios del 2006, Madrid/Barajas podrá atender en sus Edificios Terminales (antiguos T1, T2 y T3 y nuevo T4) hasta 70 millones de pasajeros al año y en su campo de vuelos a 600.000 operaciones/año, gracias a que sus 4 Pistas, paralelas 2 a 2, permitirán efectuar 120 operaciones (aterrizajes/despegues) a la hora.

El aeropuerto de Madrid/Barajas se ha ampliado con una clara vocación, la de continuar progresando en su papel de aeropuerto hub, conector y distribuidor de vuelos (Figura 1), tanto en los vuelos efectuados dentro de la red aeroportuaria española como con los vuelos trasatlánticos jugando el papel "puerta de entrada" natural entre Europa y América.

Esta voluntad, la de servir de aeropuerto de salida para los tráficos europeos hacia Centro y Sur y Norte América y de aeropuerto de entrada de estos tráficos hacia Europa, es en la que se sustenta el Plan de Negocio que justifica la fuerte

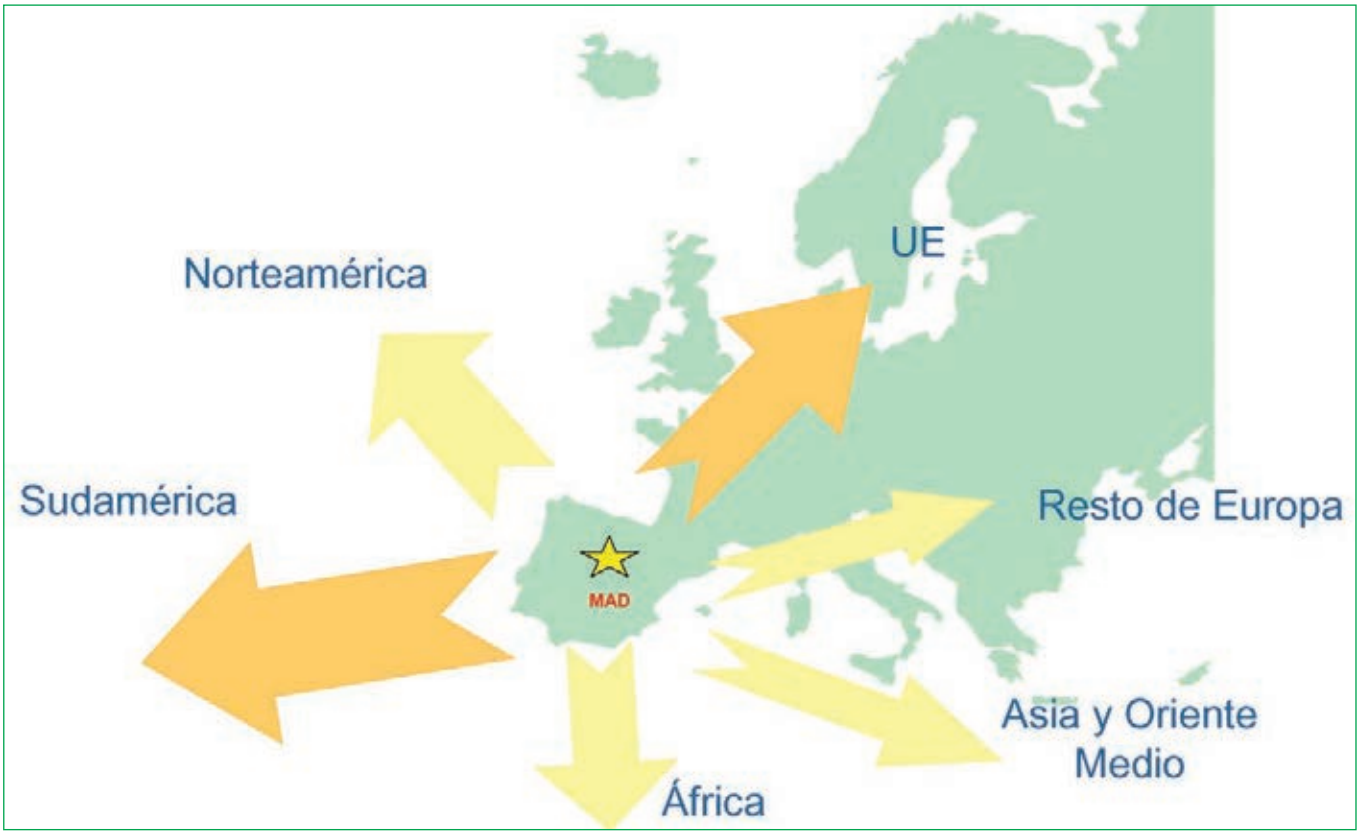


Figura 1. Papel conector y distribuidor de vuelos del aeropuerto de Barajas.
Figure 1. Barajas airport's flight connector and distributor role.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Tabla 1. Aeropuerto de Madrid/Barajas. Tráficos históricos totales.
Table 1. Madrid/Barajas airport. Total histoic traffic.

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Pasajeros (mill.) ***Passengers (mill.)***	19,96	21,87	23,62	25,50	28,01	32,89	34,05	33,92	35,87	38,74
Operaciones ***Operations***	224.332	246.507	262.661	279.567	306.754	358.489	375.558	368.029	383.804	401.510
Mercancías (Tm) ***Cargo (Tonnes)***	230.122	242.555	266.172	267.174	294.429	311.037	296.507	295.711	308.909	342.964

inversión realizada para la ampliación de las instalaciones, garantizando alcanzar la cifra de 70 millones de pasajeros entre los años 2015 y 2020, de los cuales más del 50% serán pasajeros que utilicen las instalaciones del aeropuerto tan sólo para cambiar de avión.

2. PLANTEAMIENTO BÁSICO DE LA AMPLIACIÓN DEL AEROPUERTO

Las principales referencias de la ampliación del aeropuerto de Madrid/Barajas se resumen en la Tabla 2.

Dado el carácter de aeropuerto de conexión, en el que se basa el futuro desarrollo del aeropuerto, se ha considerado la facilitación de las operaciones de conexión entre vuelos y la capacidad para atender tráficos en "oleadas", como los elementos clave que deben condicionar el diseño, tanto de los edificios y de las instalaciones que los complementan, como del campo de vuelos.

Entre las actuaciones previstas en el Plan Director, destaca la construcción de una nueva Área Terminal (T4), con capacidad para 35 millones de pasajeros, aunque el conjunto de la ampliación

Given its nature as a connection airport on which its future development is based, facilitating flight connection operations and the capacity to handle traffic in "waves" were deemed to be key elements that were to determine the design of both buildings and the facilities supplementing them, such as the flight field.

The construction of a new Terminal Area (T4), with a 35 million passenger capacity stood out amongst the actions provided for in the Master Plan, although the overall extension included other no less important actions such as

Tabla 2. Evolución del Aeropuerto de Madrid/Barajas entre los años 1996 y 2006.

SITUACIÓN 1996	SITUACIÓN 2002	SITUACIÓN 2006
INFRAESTRUCTURAS – Dos pistas cruzadas. – Dos edificios terminales de pasajeros.(nacional e internacional) y uno de carga. – 23 posiciones asistidas. – Superficie de 1.600 Ha. **TRÁFICOS ANUALES** – 21,8 millones de pasajeros. – 246.000 aeronaves. – 242.000 t de carga. **CAPACIDAD Y OTROS** – Agotamiento del campo de vuelo. – Accesos (Déficit) • Acceso viario único a Terminales • Conexión metro y ferrocarriles inexistente. – Plataforma de estacionamiento de aeronaves excesivamente estrecha y alargada (número de posiciones de contacto reducido). – Bajo nivel de pasajeros en conexión. – Capacidad: 53 operaciones a la hora.	**NUEVAS ACTUACIONES EN SERVICIO** – Dique Norte (T-3): 12 pasarelas. (entrada en servicio agosto 1997) – Nueva pista 18R-36L. (entrada en servicio noviembre1998) – Nueva Torre de control. (entrada en servicio noviembre1998) – Edificio Serv. Extinción Incendios (entrada en servicio noviembre 1998) – Nueva Central eléctrica. – Dique Sur: 5 pasarelas (entrada en servicio junio 1999) – Superficie total: 1.845 Ha **TRÁFICOS ANUALES** – 33,9 millones de pasajeros – 368.029 aeronaves – 295.710 t de carga **CAPACIDAD Y OTROS** – Accesos: Conexión con METRO – Plan de Aislamiento Acústico – Capacidad 78 operaciones a la hora	**INFRAESTRUCTURAS** – Cuatro pistas, paralelas dos a dos. – Cuatro Edificios terminales, T1,T2,T3 y T4 (T4: Ed. Terminal Principal, Ed. Terminal Satélite entre Pistas y Ed. Aparcamiento Vehículos). – 1.300.000 m^2 de terminales. – Superficie total: 3.994 Ha. – 22.505 plazas de aparcamiento. – 17.900 pasajeros en hora punta. – 104 posiciones de contacto. **CAPACIDAD Y OTROS** – Accesos • Eje N/S, E/O y Troncal de conexión T123 y T4. • Conexiones RENFE y METRO. – Capacidad 120 operaciones a la hora (más de 600.0090 operaciones año). – Capacidad 70 millones de pasajeros año

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Table 2. Evolution of Madrid-Barajas airport over the period 1996-2006.

SITUATION 1996	SITUATION 2002	SITUATION 2006
INFRASTRUCTURES – *Two crossed runways* – *Two passenger terminal buildings (domestic and international) and one cargo.* – *23 assisted positions* – *1,600 Ha in area* ***ANNUAL TRAFFIC*** – *21.8 million passengers* – *246,000 aircraft.* – *242,000 Tonnes of cargo.* ***CAPACIY AND OTHER*** – *Flight field used up.* – *Accesses (Deficit)* • *Single road access to Terminals* • *Non existent Metro and railway Connections* – *Excessively narrow and elongated aircraft parking apron (low number of contact positions)* – *Low level of connecting passengers* – *Capacity: 53 operations per hour.*	***NEW CONSTRUCTION IN SERVICE*** – *North Concourse (T-3): 12 air bridges (in service August, 1997)* – *New runway 18R-36L. (in service November, 1998)* – *New Control Tower (in service November, 1998)* – *Fire Service Building (in service November, 1998)* – *New electricity plant.* – *South concourse: 5 air bridges (in service June, 1999)* – *Total area: 1,845 Ha* ***ANNUAL TRAFFIC*** – *33.9 million passengers* – *368,029 aircraft* – *295,710 Tonnes of cargo* ***CAPACITY AND OTHER*** – *Accesses: METRO connection* – *Sound Insulation Plan* – *Capacity: 78 operations per hour*	***INFRASTRUCTURES*** – *Four runways, two by two parallel.* – *Four Terminal Buildings: T1, T2, T3 and T4 (T4: Main Terminal Bldg., Satellite Terminal Bldg. between Runways and Car Park Building).* – *1,300,000 m^2 of Terminals.* – *Total area: 3,994 Ha.* – *2,505 parking places.* – *17,900 passengers at peak hours.* – *104 contact positions.* ***CAPACITY AND OTHER*** – *Accesses* • *N/S, E/W axis and T123 and T4 connection branch* • *RENFE and METRO connections.* – *Capacity of 120 operations per hour (over 600,000 operations per year).* – *Capacity of 70 million passengers per Year*

two new runways, two new airplane parking aprons, public car parks, internal traffic accesses and roads, electricity plants, a cogeneration plant, a new fuel distribution centre, a waste treatment area and equipment such as an automated baggage handling system (ABHS), an automated system for conveying passengers between terminals (APM), a multi-service network with large processing capacities, an Integral Management System (IMS) for buildings, operation management applications and the setting up of an Airport Management Centre (AMC), from which the airport's overall operation will be controlled.

3. THE NEW TERMINAL AREA

The New Terminal Area is formed by three differentiated buildings: the Car Park Building and Set down/Pick up Area [1] [2] [3], the function of which is to support the accessibility processes, including areas for vehicle parking, vehicle access roads and train and underground railway station; the Terminal building [1] [3] [4] formed by two differentiated blocks supporting the check-in, security control and baggage claim processes and an attached concourse for domestic and Schengen flight boarding and disembarking with 38 boarding gates with direct airplane access; and the Satellite building [1] [3] [5] [6], located between the flight runways, which supports mainly international flight border crossing and boarding and disembarking processes, which has 28 boarding gates with direct airplane access, two of which are valid for handling the new Airbus A380.

The main and satellite buildings are connected by a tunnel running under the aircraft parking aprons and the flight runways through which the airport service vehicles, a train (APM) conveying passengers between buildings, and baggage by means of high speed transport lines run.

The use of two completely novel systems in Spanish airports, and state-of-the-art as regards their design and the technology employed were considered in order to achieve competitive Mini-

ción incluye otras actuaciones no menos importantes como: dos nuevas pistas, dos nuevas plataformas de estacionamiento de aeronaves, aparcamientos públicos, accesos y viales de circulación interna, centrales eléctricas, una central de cogeneración, un nuevo centro de distribución de combustible, zona de tratamiento de residuos y equipamientos como: sistema automatizado para el tratamiento de los equipajes (SATE), sistema automatizado para el transporte de pasajeros entre terminales (APM), red multiservicio con grandes capacidades de proceso, sistema de Gestión Integral (SGI) de los edificios, aplicaciones de gestión de operaciones y la creación de un Centro de Gestión Aeroportuario (CGA), desde el que se controlará el conjunto de la operación del aeropuerto.

3. LA NUEVA ÁREA TERMINAL

La nueva Área Terminal está formada por tres edificios diferenciados: el edificio de Aparcamiento de Vehículos y la Dársena de acceso [1] [2] [3], cuya función es la de soportar los procesos de accesibilidad, incluyendo áreas para el

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

aparcamiento de vehículos, viales para acceso de vehículos y estación de tren y metro; el edificio Terminal [1] [3] [4] formado por dos bloques diferenciados que soportan los procesos de facturación, control de seguridad y recogida de equipajes y un dique anexo para el embarque y desembarque de los vuelos domésticos y Schengen con 38 puertas de embarque con acceso directo a las aeronaves; y el edificio Satélite [1] [3] [5] [6], ubicado entre las pistas de vuelo y que soporta los procesos de cruce de frontera y de embarque y desembarque, fundamentalmente, de los vuelos internacionales y que dispone de 28 puertas de embarque con acceso directo a las aeronaves, dos de las cuáles son válidas para albergar el nuevo Airbus A380.

El edificio principal y el edificio satélite están conectados a través de un túnel, que discurre bajo las plataformas de estacionamiento de aeronaves y bajo las pistas de vuelo y por el que circulan los vehículos de servicio del aeropuerto, un tren (APM) que transporta los pasajeros entre los edificios y las maletas, mediante líneas de transporte de alta velocidad.

Para lograr unos valores competitivos del Tiempo Mínimo de Conexión, tanto para conexiones nacionales como internacionales, que hagan atractivo el aeropuerto como centro de conexión, se ha considerado la utilización de dos sistemas totalmente novedosos en los aeropuertos españoles y vanguardistas en cuanto a su diseño y tecnología empleada:

APM (Automatic People Mover) [1]. El Nuevo Edifico Terminal está comunicado con el Edificio Satélite por un sistema automatizado de transporte de pasajeros(APM-INTRA), que facilita el transporte de viajeros que hayan facturado en T4 y embarquen en el edificio satélite, y de los que desembarquen en el satélite y se dirijan, bien para realizar un tránsito o para recoger su maleta, al edificio principal.

El APM es un tren guiado sin conductor que se desplaza a través de un túnel subterráneo de servicios aeroportuarios, que conecta dos estaciones, una situada en el edificio principal y otra en el satélite.

El APM-INTRA está operativo las 24 horas del día y cubre una distancia entre estaciones de 2.100 metros en un tiempo de viaje entre estaciones de poco más de 3 minutos, con una frecuencia de paso de trenes de 2 minutos en horas punta y un periodo de estancia en la estación de 30 segundos. Cada convoy dispone de tres vagones, que permiten transportar, a una velocidad máxima de 60 Km/h, cerca de 13.000 pasajeros a la hora (6.500 personas por hora y dirección).

SATE [1]. Para el tratamiento de los equipajes en el Nuevo Edificio Terminal se ha diseñado un Sistema Automatizado de Tratamiento de Equipajes (SATE), que permite el procesamiento de 16.500 equipajes a la hora, centrando sus funciones en el transporte y clasificación automático, dentro del Nuevo Edificio Terminal y su Edificio Satélite, de los equipajes de llegada y salida, así como de todos los equipajes en tránsito y el transporte automático (sin clasificación) de los equipajes a entregar en la sala de recogida de equipajes.

Para el manejo de los equipajes, el SATE dispone de un total de 91 Km de cintas, de las cuales 41 Km son cintas de alta velocidad, capaces de transportar los equipajes a más de 10 m/s, parte de los cuales discurren por el túnel de servicios aeroportuarios para el transporte de maletas entre en edificio principal y el satélite; seis clasificadores para la clasificación y separación de los equipajes y dos almacenes automáticos de equipajes anticipados (facturados antes de la apertura de su vuelo) con capacidad para 2.000 maletas.

El Sistema permite la facturación universal de cualquier vuelo, incluyendo equipajes especiales. Para ello dispone de un total de 172 mostradores de facturación distribuidos en nueve isletas, dos de los cuales están dedicados en exclusiva a equipajes especiales.

Junto a estas funciones, el SATE facilita también la inspección de seguridad del 100% de todos los equipajes de salida y conexión en la nueva terminal. Dicha inspección está organizada en tres niveles de control, un primer nivel automático, un segundo nivel con operadores que visualizan la información facilitada por las máquinas de rayos X y un tercer nivel con máquinas tomográficas. En total están instaladas un total de 31 máquinas de inspección.

mum Connection Time values both for domestic and international connections which would make the airport attractive as a connection centre:

– ***APM*** *(Automatic People Mover) [1]. The New Terminal Building is connected to the Satellite Building by an automated passenger conveyance system (APM-INTRA), which facilitates the transport of travellers who have checked in at T4 and board in the satellite building, and of passengers disembarking in the satellite and travelling to the main building either in transit or to claim their luggage.*

The APM is a driverless train running through an underground airport service tunnel connecting two stations, one in the main building and the other in the satellite.

The APM-INTRA is operative round the clock and covers a distance between stations of 2,100 metres in a journey time of a little more than 3 minutes, with trains running at a rate of every 2 minutes at peak times and a stay of 30 seconds in the station. Each train has three carriages enabling close on 13,000 passengers an hour to be conveyed at a maximum speed of 60 km/h (6,500 people per hour and direction).

ABHS *[1]. An Automated Baggage Handling System (ABHS) was designed for baggage handling in the New Terminal Building, allowing 16,500 pieces of luggage to be processed per hour, centring its functions on arrival and departure baggage conveyance and automatic sorting in the New Terminal Building and its Satellite Building, as well as all transit baggage and automatic transport of baggage (without sorting) to be delivered in the baggage claim hall.*

The ABHS has a total of 91 kms of belts for baggage handling, of which 41 kms are high speed, able to convey baggage at more than 10 m/s, part of which run through the airport service tunnel for conveying luggage between the main and satellite buildings; six sorters for baggage sorting and separating and two automatic stores for anticipated luggage (checked-in before their flight opened) with a capacity for 2,000 suitcases.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

The system allows for universal check-in of any flight, including special baggage. It has a total of 172 check-in counters distributed over nine islands, two of which are exclusively earmarked to special luggage.

Together with these functions, the ABHS also facilitates 100% security inspection of all departure and connection luggage in the new terminal. This inspection is organised into three control levels, a first one automatic, a second with operators viewing the information furnished by the X-ray machines and a third with scanning machines. In all, a total of 31 inspection machines have been installed.

Other systems focussed on aeronautical management and representing the "intelligence" without which the service provided for could not be rendered with quality and efficiency, are included within the Terminal Building and Car Park Building facilities, apart from the usual electro-mechanical and IT systems in any construction of this type; the Airport Management System (AMS) particularly stands out for its importance for airport management and for its novel nature which involves the most advanced development in airport management systems currently existing in the world.

The need to avail of a single control, analysis, decision and command centre for the activities of each system attached to service production in the new facilities led to discussions on setting up an Airport Management Centre where information could be collected on the status of systems and infrastructures and on the activities of people for:

- *Monitoring, controlling and adapting the service provided.*
- *Relating different activities to each other.*
- *Discriminating between possible adaptations.*
- *Deciding on coordination between areas involved.*
- *Planning and supervising adaptation activities.*
- *Handling the infrastructures facilitating the service locally or remotely.*
- *Real time adjusting the performance of processes.*
- *Detecting trends and proposing preventive measures and preventing hazards.*

A hardware/software information packet reception, processing, analysis and distribution centre was therefore designed and information transmission channels were enabled (image, voice, data), establishing communication protocols (channel and content), defining a system integration structure (technological and architectural integration directives) and developing activity performance procedures which will enable intervention to be placed in hierarchical order by laying down service levels and measuring and controlling service rendering.

This all asssures the joint operation of the airport systems with the purpose of improving operational management, coordination, control and monitoring of the services provided, facilitating the performance of procedures to adapt the airport services situations at all times and under all circumstances, guaranteeing an overall view of what is happening in the airport at any time, and that each player in the processes perform those tasks for which he is responsible and know the impact his actions have on other areas of the process.

The Airport Management Centre solves current problems, such as difficulty in coordination, lack of information for decision making, multiplicity of uncoordinated information channels, long response times and unproductive use of staff, in an infrastructure that is doubling its capacity and almost exponentially increasing its complexity.

Madrid has the most modern airport as from the commissioning of the new facilities at the beginning of 2006. It can now offer the installations with most capacity in Europe. This moment meant the end to a huge task carried out over 5 years by Aena and, likewise, has meant the commencement of another, even more important job, that of providing the service it had specified, through the new infrastructures, whilst managing to obtain a return on the extremely heavy investment made,

Dentro de las instalaciones de los Edificios Terminales y Aparcamientos de Vehículos, además de los sistemas electromecánicos e informáticos habituales en cualquier construcción de estas características, se incluyen otros sistemas enfocados a la gestión aeronáutica y que representan la "inteligencia" sin la cual no sería posible prestar el servicio previsto con calidad y eficiencia, en particular destaca por su importancia para la gestión del aeropuerto y por su novedad, y que supone el desarrollo más avanzado en sistemas de gestión aeroportuaria que existe en la actualidad en el mundo: el Centro de Gestión Aeroportuaria (CGA).

La necesidad de disponer de un único centro de control, análisis, decisión y mando sobre actividades de cada sistema adscrito a la producción de servicios en las nuevas instalaciones, llevó a plantearse la creación de un Centro de Gestión Aeroportuaria en el que se pudiera recoger la información sobre el estado de sistemas e infraestructuras y de las actividades de las personas para:

- Monitorizar, controlar y adaptar el servicio prestado.
- Relacionar distintas actividades entre sí.
- Discriminar entre adaptaciones posibles.
- Decidir la coordinación entre áreas implicadas.
- Ordenar y supervisar las actividades de adaptación.
- Maniobrar local o remotamente las infraestructuras que facilitan el servicio.
- Ajustar en tiempo real la ejecución de los procesos.
- Detectar tendencias y proponer medidas preventivas y prevenir riesgos.

Para ello se ha diseñado un centro físico/lógico de recepción, tratamiento, análisis y distribución de paquetes informativos, habilitando canales de transmisión de información (imagen, voz, datos), estableciendo protocolos de comunicación (canal y contenido), definiendo una estructura de integración de sistemas (directrices tecnológicas y arquitectura de integración) y desarrollando procedimientos de ejecución de actividades que permitirán, estableciendo niveles de servicio, jerarquizar la intervención y medir y controlar la prestación del servicio.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Todo ello asegura la operación conjunta de los sistemas aeroportuarios, con el propósito de mejorar la gestión operativa, la coordinación, el control y la monitorización de los servicios prestados, facilitando la ejecución de los procedimientos para adaptar los servicios aeroportuarios a las situaciones y circunstancias de cada momento, garantizando en todo momento, disponer de una visión global de lo que sucede en el aeropuerto, y que cada actor en los procesos ejecute aquellas tareas de las que es responsable y pueda conocer el impacto que sus acciones tiene en otras áreas del proceso.

El Centro de Gestión Aeroportuaria solventa problemas actuales, como la dificultad de coordinación, falta de información para la toma de decisiones, multiplicidad de canales de información no coordinados, largos plazos de respuesta y uso poco productivo del personal, en una infraestructura que dobla su capacidad y aumenta, casi exponencialmente, su complejidad.

A partir de la puesta en servicio de las nuevas instalaciones, a principios del año 2006, Madrid cuenta con el aeropuerto más moderno y ofrece las instalaciones con mayor capacidad de Europa. Este momento ha supuesto el fin de una ingente labor realizada durante 5 años por Aena y ha supuesto, así mismo, el inicio de otra labor, aún más importante, el lograr prestar, a través de las nuevas infraestructuras, el servicio que se había especificado, logrando rentabilizar, tanto desde el punto de vista económico como de calidad de servicio, la importantísima inversión realizada.

La realización de este sueño garantiza el que España siga jugando, en el ámbito del transporte aéreo internacional, el papel que por su desarrollo económico merece.

REFERENCIAS

[1] Lamela, Carlos; Moya, Paz: "Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Fernel Fernández, José Pedro: "Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Fernel Fernández, José Pedro: "Edificio Satélite de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: "Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

both from the point of view of economic profitability and service quality.

In fulfilling this dream, Spain is guaranteed to continue playing the role it deserves in the sphere of international air transport because of its economic development.

REFERENCES

[1] Lamela, Carlos; Moya, Paz: "Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[2] Fernel Fernández, José Pedro: "Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[3] Fernel Fernández, José Pedro: "Edificio Satélite de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[4] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: "Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Despegamos todos

Ampliación del Aeropuerto de Madrid-Barajas

Se ha ampliado el Aeropuerto de Madrid-Barajas. La mayor obra civil aeroportuaria de Europa que convierte a nuestro aeropuerto en el segundo del continente por capacidad y en la gran puerta de Europa a Iberoamérica. Esta ampliación aporta beneficios para todos: incrementa la capacidad con la puesta en funcionamiento de 2 nuevas pistas que permiten alcanzar los 70 millones de pasajeros al año, aumenta el número de aterrizajes y despegues por hora, proporciona una mayor rapidez y comodidad en los embarques y multiplica por 4 la superficie de terminales. Bienvenidos.

Madrid-Barajas ha cambiado.
902 404 704 o visite www.aena.es

MINISTERIO DE FOMENTO

Aena Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal

Architectural concepts of the new Terminal Area

Carlos Lamela
Arquitecto. Presidente Ejecutivo de Estudio Lamela

Paz Moya
Arquitecto técnico. Estudio Lamela

RESUMEN

Conjugar belleza y funcionalidad. Este ha sido el objetivo de la ampliación del aeropuerto de Barajas, la mayor obra civil reciente en Europa, firmada por el español Estudio Lamela, el estudio inglés Richard Rogers Partnership y las ingenierías TPS e INITEC. Más de un millón de metros cuadrados acogen el conjunto formado por el edificio Terminal, el edificio Satélite y el Aparcamiento. Es la cubierta –revestida exteriormente de aluminio y tapizada en su interior por lamas de bambú– el elemento que determina la imagen ondulada de la estación, por la que podrán discurrir cada año 70 millones de pasajeros.

Palabras clave: Aeropuerto, Terminal, Satélite, Barajas, Bambú.

1. INTRODUCCIÓN

Ante el continuo y espectacular crecimiento de las comunicaciones aéreas, Aena (Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea) comenzó a desarrollar el proyecto denominado Plan Barajas, con la intención de organizar una planificación global de infraestructuras aeroportuarias, estableciendo en Madrid un «hub» como punto estratégico de conexión entre Europa y América. Era por tanto necesario llevar a cabo una operación que permitiese cumplir el objetivo de poder atender al doble de viajeros, entre 65 y 70 millones anuales.

En esta actuación territorial, además de la creación de dos nuevas pistas y una compleja conexión viaria de transportes públicos y privados, se contemplaba la construcción de la Nueva Área Terminal (NAT). Para la redacción del proyecto de la Nueva Terminal se convocó un concurso internacional, promovido por *Aena*, en el que seleccionaron once proyectos. En octubre de 1997 se eligió la propuesta presentada por el equipo formado por cuatro empresas: el estudio de arquitectura español *Estudio Lamela* y el británico *Richard Rogers Partnership*, la ingeniería española *Initec* y la británica *TPS*. El proyecto ganador destacaba por su sencillez, su adaptabilidad y su flexibilidad, admitiendo con naturalidad los posibles cambios y futuras ampliaciones (Figura 1).

SUMMARY

To combine beauty and functionality. This was the aim in extending Barajas airport, the largest recent civil building in Europe, designed by the Spanish Estudio Lamela, the English Richard Rogers Partnership and TPS and INITEC consulting engineering firms. More than one million square metres are covered by the Terminal, Satellite and Car Park buildings. The roof, exterior aluminium clad and interior bamboo lined, is the element shaping the undulating silhouette of the complex which will be able to handle up to 70 million passengers a year.

Key words: *Airport, Terminal, Satellite, Barajas, Bamboo.*

1. INTRODUCTION

In the light of the continuous, spectacular growth of communications by air, Aena (Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea) commenced developing the project called Plan Barajas, with the intention of organizing overall airport infrastructure planning by set-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 1. Edificio Terminal. Vista del dique en su extremo sur.
Figure1. Terminal Building. View of the pier at its south end

ting up a hub in Madrid as a strategic point for connecting Europe and America. It therefore became necessary to undertake an operation that would enable the aim of handling double the number of travellers, between 65 and 70 million a year.

Apart from building two new runways and a complex, public and private road connection system, this regional operation addressed the building of the New Terminal Area (NTA). An international tender promoted by Aena, was called for, for drawing up the New Terminal's design, and eleven designs were selected. In October, 1997, the bid as submitted by the team formed by four companies was chosen: the Spanish architectural enterprise Estudio Lamela and the British Richard Rogers Partnership, the Spanish consulting engineering firm Initec and the British TPS. The award winning design stood out for its simplicity, adaptability and flexibility, in accepting possible changes and future extensions with all naturalness (Figure 1).

With its 1,200,000 m^2 built up area, the New Barajas Terminal Area is considered to be the major construction work to have been built recently in Europe, with all this involves as regards urban, economic and social development for the region of Madrid and for Spain. The final result is a functional, aesthetically attractive design whose main value is the balance achieved between these two aspects.

2. AIMS OF THE DESIGN

Above all, the design's criteria had the aim of combining the undertaking of an operation of such magnitudes with the creation of inhabitable spaces on a human scale. This fact combined with environmental and landscape concerns as fundamental criteria determining the design's spatial and formal conception. Oudoors, respect for and strengthening of the landscape was the main target whilst indoors, the aim was to grant protagonism to natural lighting unusual in this type of building.

As a supplementary decision, it was opted to include materials which, for their textures, placing and colours, would give passengers a feeling of peace and quiet as a counterpart to the stress and anxiety usually perceptible in most airports. The choice of transparent materials for vertical items (glass screens and façades, façade parasols, etc.) proves to be a determining factor for making the passenger feel at ease, at all times guiding him and letting him know to where he has to go and how much is left before he reaches his destination inside the airport. The cream and ochre shades of the limestone in the paving provide for warm, welcoming lighting. And as an element unifying the whole of the interior space we have the bamboo ceiling; its undulating profile appears as a pleasant companion to the traveller throughout the different processes involving check-in, security control and boarding.

Con sus 1.200.000 m^2 de superficie construida, la Nueva Área Terminal de Barajas está considerada como la mayor obra que se ha edificado recientemente en Europa, con todo lo que implica en cuanto a trascendencia urbanística, económica y social para la región de Madrid y para España. El resultado final es el de un diseño funcional y estéticamente atractivo, cuyo principal valor es el equilibrio logrado entre estos dos aspectos.

2. OBJETIVOS DEL DISEÑO

Ante todo, el proyecto tuvo como punto de partida el objetivo de combinar la ejecución de una actuación de semejantes magnitudes con la creación de unos espacios habitables y de escala humana. Éste hecho se une a las preocupaciones medioambientales y paisajísticas como criterios fundamentales que determinaron la concepción espacial y formal del proyecto. En el exterior, se buscaba el respeto y la potenciación del paisaje. En el interior, se pretendía otorgar a la iluminación natural un protagonismo inusual en este tipo de edificios.

Como decisión complementaria, se buscaba la inclusión de unos materiales que, por sus texturas, colocación y colores, transmitiesen al pasajero una sensación de sosiego en contrapartida al estrés y agobio que suelen estar presentes en la mayoría de los aeropuertos. La elección de materiales transparentes

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

para los elementos verticales (pantallas y fachadas de vidrio, parasoles de fachada...) resulta determinante para tranquilizar al pasajero, orientándole en todo momento y haciéndole saber hacia dónde tiene que dirigirse y cuánto le queda para llegar a su destino dentro del aeropuerto. En el pavimento, los tonos crema y ocres de la piedra caliza favorecen una luminosidad cálida y acogedora. Y como elemento unificador de todo el espacio interior aparece el techo de bambú; su perfil ondulante se presenta como un amable acompañante del viajero a lo largo de los diferentes procesos de facturación, control y embarque.

El proyecto que seleccionó Aena para su construcción, se caracterizaba por cuatro criterios básicos que definieron estrictamente todos los aspectos del diseño final:

Concepto del paisaje

Las terminales de los aeropuertos se encuentran normalmente rodeados de elementos secundarios (aparcamiento de vehículos, central eléctrica, etc.) que no contribuyen a la clara orientación del pasajero. En la propuesta de este diseño se integran dichas estructuras en la topografía del lugar dando al NAT una imagen integrada con el paisaje, expresando su carácter local y homogéneo. Los cañones establecen una secuencia en la que se integra linealmente el paisaje incorporándose al espacio interior. El perfil ondulado de la cubierta de Terminal y Satélite, y la cubierta vegetal de Aparcamiento contribuyen a la integración de la actuación con el entorno.

Luz natural

Cada módulo funcional se separa transversalmente mediante un cañón (espacio vacío cubierto con lucernarios) y sirve de paso previo entre los diferentes procesos por los que ha de pasar el pasajero, facilitando su orientación. Además, el cañón permite la entrada controlada de luz solar en el interior, reduciendo significativamente la dependencia de la luz artificial y mejorando sumamente la calidad del espacio. Los lucernarios circulares y las fachadas acristaladas refuerzan la importancia de la luz natural en los edificios.

Claridad espacial

El flujo de pasajeros recorre de manera secuencial todas las funciones del edificio, desde el momento de la recepción de los viajeros en la dársena, pasando por la facturación y el control de seguridad hasta llegar al embarque. El recorrido inverso (llegadas) también está claramente diferenciado: desembarque, recogida de equipajes, dársenas. La forma de los edificios, fragmentada en una serie ordenada de bloques funcionales, facilita el proceso de las actividades. Se da la circunstancia de que los recorridos de pasajeros de llegada y de salida discurren por diferentes niveles (nivel +2, salidas; nivel +1, oficinas y comercio; nivel 0, llegadas).

Flexibilidad

Se propone una configuración adaptable a todo el conjunto de la actuación, manteniendo una fuerte identidad arquitectónica durante las sucesivas fases de evolución del proyecto. Por otro lado, la decisión de utilizar la repetición de módulos como mecanismo de proyecto supone la posibilidad de ampliar los edificios en un futuro sin desvirtuar la imagen y la esencia iniciales del edificio, añadiendo más módulos si fuera necesario (Figura 2).

3. DESCRIPCIÓN DE LA ACTUACIÓN

La Nueva Área Terminal del Aeropuerto internacional Madrid Barajas (futura T4) se ubica a 4 km al norte del antiguo Barajas (terminales T1, T2 y T3). Con un programa de necesidades muy extenso y complejo, el conjunto mantuvo la idea original del concurso, respondiendo a una organización básica compuesta por tres edificios (Figura 3):

- Un **Aparcamiento** de vehículos de 309.000 m^2, con capacidad para 9.000 plazas [1] y [2].
- Un **Edificio Terminal**, próximo al Aparcamiento y separado de éste por las dársenas de acceso de vehículos. Está pensado para los vuelos nacionales y Schengen (es decir, con destino a países de la Unión Europea). Con cerca de medio

The design Aena chose to be built was characterised by four basic criteria that strictly defined all aspects of the final design:

Concept of landscape

Airport terminals are normally surrounded by secondary elements (car parks, electricity plants, etc.) which do not contribute towards providing clear guidance to the passenger. In this design's proposal, these structures are integrated into the site's topography giving the NTA an image blending with the landscape, expressing its local, homogeneous character. The tunnels establish a sequence into which the landscape is linearly integrated whilst being incorporated into the inside area. The undulating profile of the Terminal's and Satellite's roof and the Parking Building's garden roof contribute towards the construction's blending into the surroundings.

Natural light

Each functional module is transversally separated by a sunlit area (an empty space covered with skylights) and acts as a prior step between the different processes through which the passenger has to pass, facilitating his guidance. Furthermore, this area allows sunlight to enter in a controlled fashion, significantly reducing dependency on artificial light and utterly improving the quality of the space. The circular rooflights and glass façades strengthen the importance of natural light in the buildings.

Spatial clarity

The passenger flow sequentially follows all the building's functions, from the traveller's reception at the set down/pick up area, passing through check-in and security control until arriving at boarding. The reverse run (arrivals) is also clearly differentiated: disembarking, baggage claim, set down/pick up areas. The shape of the buildings, split into an ordered series of functional blocks, facilitates the process of activities. It transpires that the passengers' arrival and departure routes

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

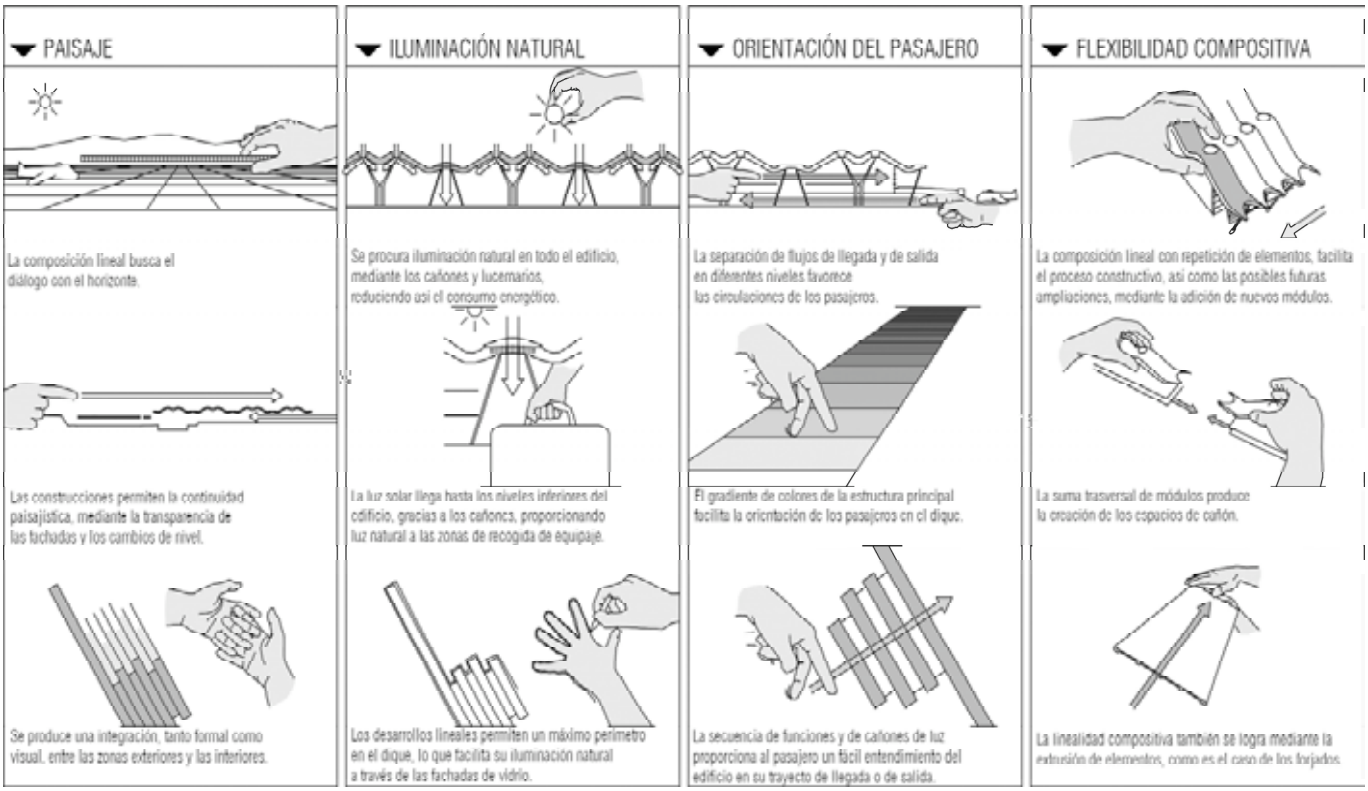


Figura 2. Esquemas explicativos de los conceptos básicos del proyecto.
Figure 2.Explanatory sketches about the basic design concepts.

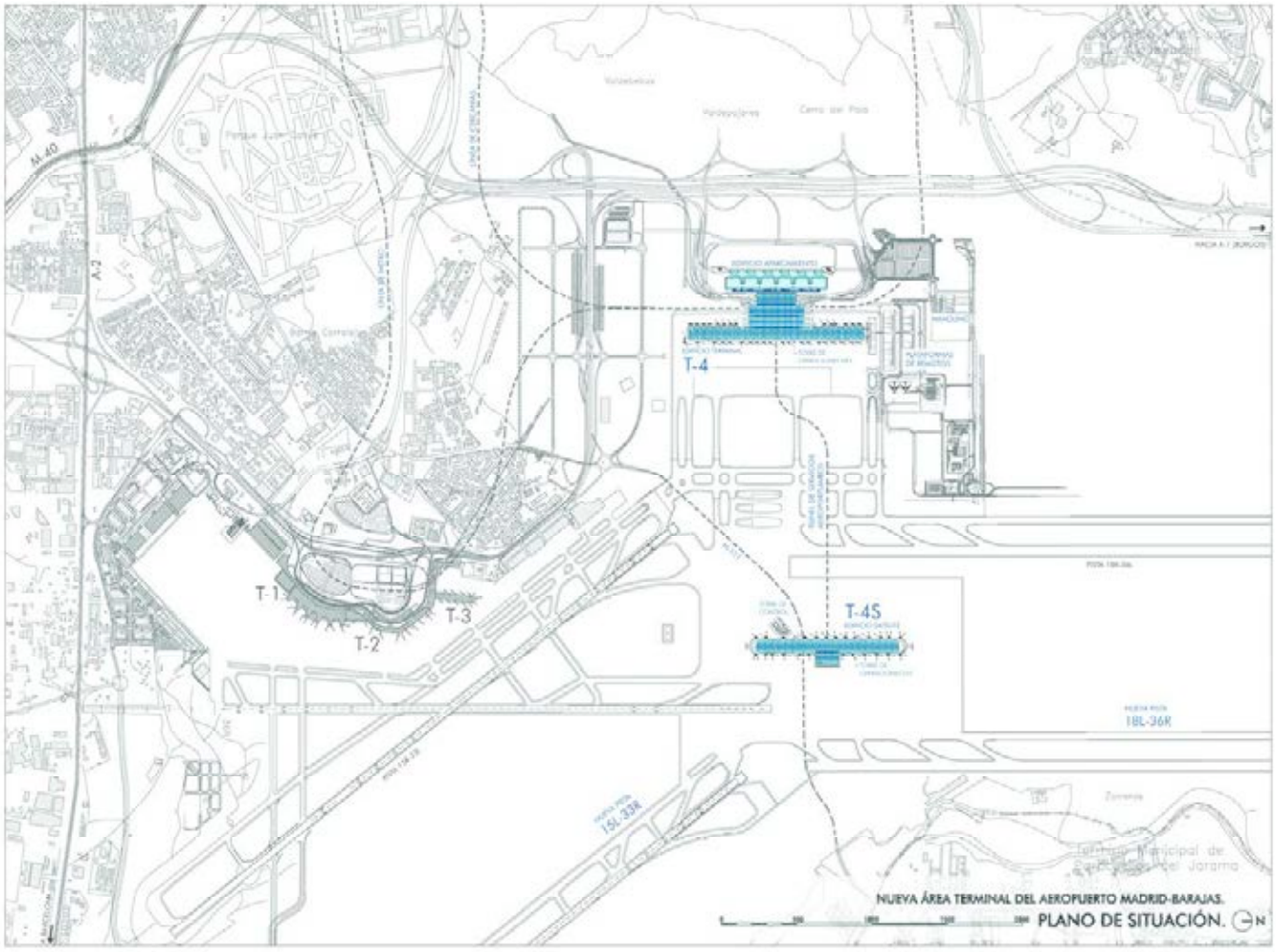


Figura 3. Plano de situación.
Figure 3. Site plan.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

millón de metros cuadrados construidos (distribuidos en 6 niveles), cuenta con 174 mostradores de facturación y con 41 posiciones de contacto de aeronaves, a través de pasarelas telescópicas ubicadas en el dique de embarque, el cual tiene una longitud de 1,2 km [1] [3] y [6].

- El **Edificio Satélite**, situado entre las nuevas pistas (separado del Terminal unos 2 km), albergará la totalidad de los vuelos internacionales no Schengen de la NAT. Contará además con una zona adaptable a todo tipo de destinos: no Schengen, internacional, nacional y Schengen (como posible complemento al edificio Terminal). El edificio tiene casi 300.000 metros cuadrados y 26 plazas de estacionamiento de aeronaves. Si el tráfico aéreo continúa aumentando, el proyecto original contempla la posibilidad de construir un segundo satélite, en el lado este del actual Satélite [1] [4] y [5].

4. EL EDIFICIO APARCAMIENTO

El edificio Aparcamiento se compone de 6 módulos independientes funcionalmente, pero unificados visualmente mediante los revestimientos exteriores y la cubierta (de tipo vegetal). El acceso directo al Aparcamiento en vehículo desde los viales (sin necesidad de pasar por las dársenas) se produce atravesando uno de los seis pasos con barrera, en donde se asigna automáticamente a cada vehículo una plaza de estacionamiento (Figura 4).

A pesar del programa propio de un aparcamiento, donde el protagonista pudiera parecer el vehículo, se ha intentado humanizar los espacios, procurando abundante luz natural utilizando cerramientos muy permeables y patios interiores. Además se ha ajardinado el espacio entre rampas y módulos. Uno de los elementos más significativos del proyecto es la cubierta ecológica del aparcamiento, en la que se han distribuido bandas de diferentes especies vegetales autóctonas, seleccionando aquellas cuyo mantenimiento y consumo de agua fuera mínimo. El resultado final es una de las cubiertas vegetales más grandes de España (56.000 m^2), proporcionando al Aparcamiento, a pesar de sus dimensiones, un impacto visual mínimo con respecto al paisaje colindante.

Desde el aparcamiento se llega directamente al edificio Terminal mediante pasarelas peatonales de conexión. Ambos edificios, Aparcamiento y Terminal, se encuentran separados por las Dársenas. Esta es la zona donde confluyen autobuses, taxis, metros, trenes y vehículos particulares, a modo de intercambiador de transportes. Espacialmente, las dársenas se componen de una serie de viales y plataformas a diferente nivel, resguardados todos ellos bajo la prolongación de la cubierta ondulada del Terminal (Figura 5).

Figura 4. Edificio Aparcamiento. Acceso para vehículos desde los viales exteriores.
Figure 4.Car Park Building. Vehicle access from outside roads.

run on different levels (level +2, departures; level +1, offices and shops; level 0, arrivals).

Flexibility

A configuration adaptable to the whole unit is proposed, whilst maintaining a strong architectural identity during the successive phases of the design's development. Moreover, the decision to use module repetition as a design mechanism allows for the possibility of future extensions to the buildings without impairing the building's initial image and essence, by adding further modules if necessary (Figure 2).

3. DESCRIPTION OF THE OPERATION

The New Madrid Barajas International Airport Terminal (the future T4) is located 4 km to the north of the old Barajas (terminals T1, T2 and T3). With a very extensive, complex requirement programme, the overall kept to the tender's original idea, responding to a basic organisation formed by three buildings (Figure 3):

- *A 309,000 m^2* ***Car Park****, with a 9,000 car capacity [1] [2].*

- *A* ***Terminal, Building*** *close to the Car Park, separated from the latter by the set down/pick up vehicle access areas. It is intended for domestic and Schengen flights (i.e., with European Union country destinations). With close to half a million built up square metres (on 6 levels), it has 174 check-in desks and 41 aircraft contact positions through telescopic fingers located in the pre-boarding area, which is 1.2 km long [1] [3] and [6].*

- *The* ***Satellite Building****, located between the new runways (about 2 kms from the Terminal) will house the whole of the NTA's non Schengen international flights. It will also have an area adaptable to all types of destination: non Schengen, international, domestic and Schengen (as a possible supplement to the Terminal building). The building has almost 26,000 square metres*

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 5. Alzado y sección transversal de los edificios Aparcamiento y Terminal.
Figure 5. Elevation and cross section of the Car Park and Terminal buildings.

and 26 aircraft parking points. If air traffic continues increasing, the original design addresses the possibility of building a second satellite building on the east side of the present Satellite [1], [4] and [5].

4. THE CAR PARK BUILDING

The Car Park building is made up of 6 modules which, whilst being functionally separate, are visually joined by the outside claddings and the roof (garden type). The Car Park is directly accessed by vehicle from the roads (without passing through the set down/pick up areas) through one of the entrances with a barrier where a parking place is automatically assigned to each vehicle (Figure 4).

Despite a car park's typical programme, where the lead player might seem to be the vehicle, an attempt has made to humanise spaces, seeking abundant natural light by using highly permeable walls and interior patios. The space between ramps and modules has also been landscaped. One of the design's most significant elements is the car park building's ecological roof, where rows of different autochthonous plant species have been laid out, whilst selecting those whose maintenance and water consumption were minimal. The final result is one of the largest garden roofs in Spain (56,000m^2), such that the Car Park has a minimal visual impact with respect to the surrounding landscape, despite its dimensions.

The Terminal building is reached directly from the car park via connecting pedestrian walkways. Both buildings, Car Parks and Terminal, are separated by the set down/pick up areas. This is where buses, taxis, metros (underground railway), trains and private vehicles come together in a kind of transport interchange. Spacewise, these areas are formed by a series of roads and platforms on a different level, all sheltered under the prolongation of the Terminal's undulating roof (Figure 5).

Supplementary descriptions and further data on this building are available in [1] and [2].

5. THE TERMINAL BUILDING

The Terminal Building is formed by three linear modules (Check-in, Processor, Pier), *fulfilling different functions depending on passenger flows (arrivals or departures). Passenger reception, check-in, security control and boarding for departing flights; disembarking, baggage claim and passenger exit from the building, for arriving flights.*

These modules are separated from each other by what are called sunlit areas, *which appear as large cracks of light by means of which natural illumination is obtained at the building's lower levels. Thus the sunlit areas form part of the overall environmental strategy – natural lighting, quality of the air, natural surroundings – which enables alternative energies to be incorporated and energy consumption and, consequently, maintenance and upkeep costs, to be reduced. Passengers move vertically in these spaces, whether by stair-*

Descripciones complementarias y otros datos de este edificio pueden encontrarse en [1] y [2].

5. EL EDIFICIO TERMINAL

El Edificio Terminal está compuesto por tres módulos lineales (*Facturador, Procesador, Dique*), cumpliendo diferentes funciones según los flujos de pasajeros (llegadas o salidas). Recepción de pasajeros, facturación, control y embarque para vuelos de salida; desembarque, recogida de equipajes y salida de pasajeros del edificio, para vuelos de llegada.

Éstos módulos están separados entre sí por los denominados *cañones*, que se presentan como grandes grietas de luz mediante las cuales se consigue iluminación natural en los niveles inferiores del edificio. Así pues, los cañones forman parte de la estrategia medioambiental global –iluminación natural, calidad del aire, entorno natural– que permite incorporar la utilización de energías alternativas, la reducción de consumos energéticos y, consecuentemente, la de gastos de mantenimiento y conservación. En estos espacios es donde se producen todos los movimientos verticales de los pasajeros, ya sea por escalera, rampa o ascensor. Además constituyen un elemento importante para la orientación del pasajero, puesto que marcan la secuencia de acciones que tiene que desempeñar el pasajero en su trayecto de llegada o de salida.

Un cañón da la bienvenida al pasajero que accede desde las dársenas o el

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Aparcamiento. Pasado el primer cañón se accede al primer módulo (*Facturador*), donde (en el nivel +2) se realiza la facturación de equipajes. En esta zona los mostradores y sistemas de tratamiento de equipajes se han agrupado en isletas, dejando libres grandes espacios intermedios para permitir una circulación fluida en sentido transversal al módulo *(Figura 6)*. Realizados los trámites de facturación, y atravesando otro cañón (éste sólo con circulación horizontal), se pasa al siguiente módulo (*Procesador*). En este segundo módulo nos encontramos con los controles de seguridad, junto con una amplia zona comercial. Ésta se ha definido mediante volúmenes cerrados con una altura aproximada de 4,20 m, sin llegar al techo, evitando así la sensación de compartimentación.

Figura 6. Facturación (nivel +2).
Figure 6. Check-in (level +2).

Finalmente, a través del tercer y último cañón del terminal (con comunicaciones verticales y horizontales) se accede al *Dique*, siendo éste el módulo mas largo, con 1.200 m de longitud. Aquí se efectúa el embarque a los aviones (nivel +1) por medio de prepasarelas perpendiculares a fachada.

Las llegadas se producen siempre en el nivel 0. Los pasajeros acceden directamente hacia la zona de recogida de equipajes, que cuenta con unos elementos de climatización (*dragones*) e iluminación (*woks*) de diseño especial. Estos elementos, unidos a la llegada de luz natural a través de los cañones, hacen que las áreas de recogida de equipaje adquieran unas características espaciales muy singulares (Figura 7).

Descripciones complementarias y otros datos de este edificio pueden encontrarse en [1] y [3].

6. EL EDIFICIO SATÉLITE

La existencia de un edificio Satélite, separado del edificio Terminal, se debe a varios motivos. El principal de ellos es la segregación de funciones. Es decir, se presentaba la necesidad de

Figura 7. Recogida de equipaje (nivel 0).
Figure 7. Baggage claim (level 0).

way, ramp or lift. They are also an important element for guiding the passenger since they set the sequence of actions he has to take on his arrival or departure route.

A sunlit area welcomes the passenger gaining access from the set down/pick up areas or Car Park. Having passed through the first sunlit area, access is gained to the first module (Check-in), *where (on level +2) baggage is checked in. Check-in counters and baggage handling systems have been grouped into islands in this area, leaving large clear, intermediate spaces for allowing fluid movement in a direction transversal to the module* (Figure 6). *The next module* (Processor).*is reached after having checked-in and having passed through another sunlit area (with horizontal flow only). Here in this second module, we come to security controls next to an extensive shop area. The latter has been defined by means of enclosed volumes with an approximate height of 4.20 m without reaching the ceiling and thus avoiding a feeling of compartmentation.*

Finally, access is gained to the Concourse *which is the longest module with 1,200 m, through the terminal's third and last sunlit area (with vertical and horizontal connections). Aircraft are boarded here (level +1) via foot bridges perpendicular to the façade.*

Arrivals always use level 0. Passengers directly access the baggage claim

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

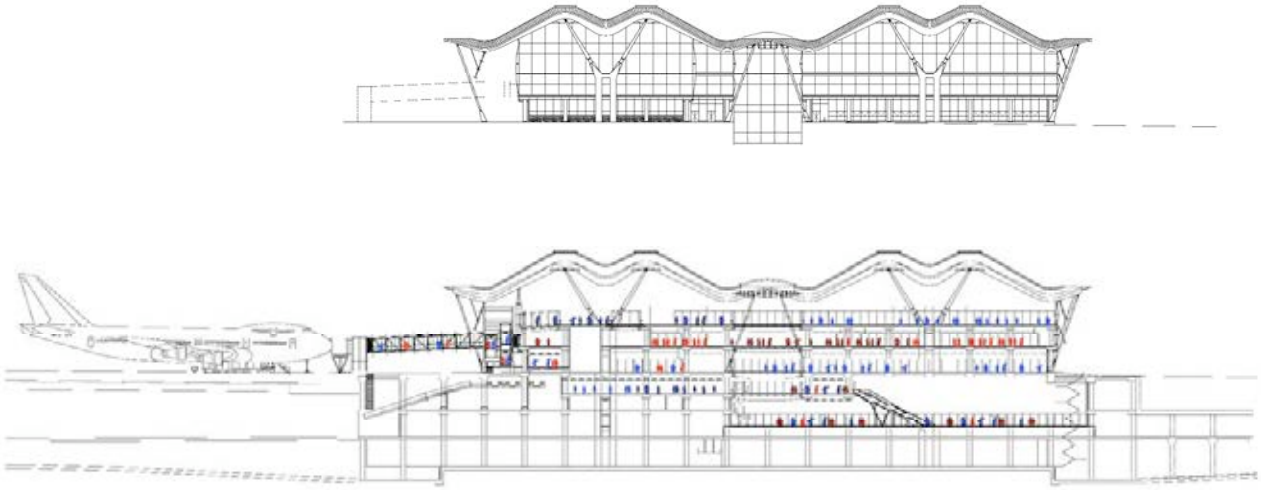


Figura 8. Alzado y sección transversal del edificio Satélite.
Figure 8. Elevation and cross section of the Satellite building.

area which has specially designed elements of air conditioning (dragons) and beacon lights (woks). Combined with natural light arriving through the sunlit areas, these elements give very unique spatial characteristics to baggage claim areas (Figure 7).

Supplementary descriptions and other data on this building are available in [1] and [3].

6. THE SATELLITE BUILDING

Separated from the Terminal building, the Satellite building exists for several reasons, the main one being to segregate functions. That is to say, it was necessary to create a building able to separate non Schengen flight passenger flows. In view of its use, the Satellite building's operating scheme is more complex since the security measures to be taken, varying as a function of flight destinations and origins, largely determined the inside layout. Broadly speaking, the same scheme as the Terminal building is kept to, although the Satellite is only formed by two modules separated by one sunlit area (Figure 8). Compared to the Terminal, the biggest difference is the inclusion of a central dividing wall or

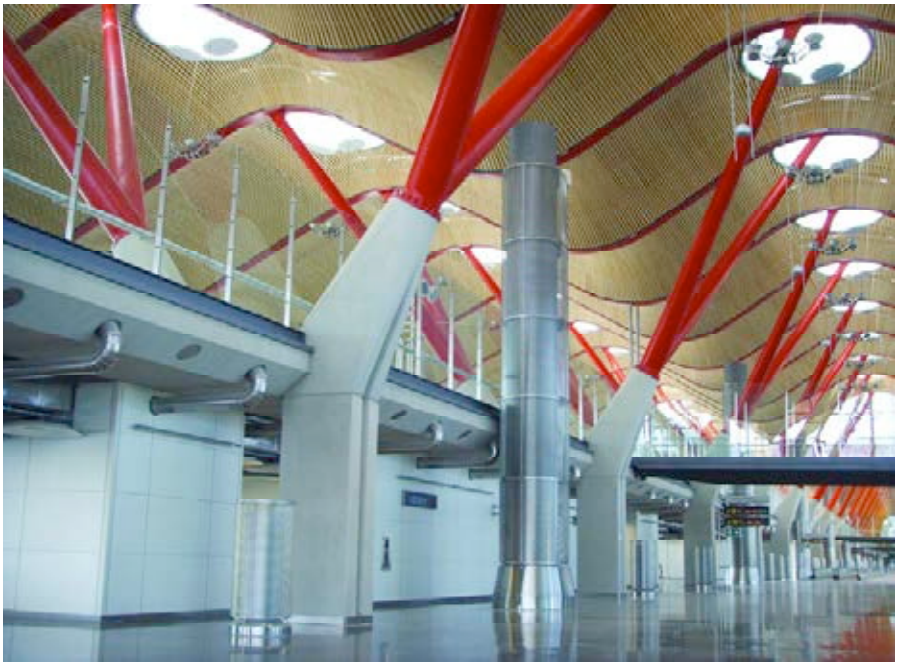


Figura 9. Dique de Satélite, con dos niveles: uno para embarque y otro para desembarque.
Figure 9. Satellite pier, with two levels, one for boarding and the other for disembarking.

crear un edificio capaz de separar los flujos de pasajeros de los vuelos no Schengen. Dado su uso, el esquema de funcionamiento del edificio Satélite es más complejo, ya que las medidas de seguridad que deben tomarse, variables en función del destino y procedencia de los vuelos, han determinado en gran medida la distribución interior. Se mantiene a grandes rasgos el mismo esquema que el edificio Terminal, aunque el Satélite se compone tan sólo de dos módulos separados por un cañón (Figura 8). La diferencia más importante con respecto al Terminal es la inclusión en el dique de una espina central a nivel +2, de manera que embarques y desembarques se pueden realizar a diferentes niveles, sin interferencia de flujos (Figura 9).

La separación de los edificios Terminal y Satélite (2 km aproximadamente) atiende a motivos aeronáuticos como son la situación y extensión de las pistas de aterrizaje y despegue (existentes y nuevas). Los dos edificios están conectados mediante un túnel que discurre bajo las pistas. El túnel consta de dos pisos con tres vanos o "tubos" cada uno (Figura 10). El nivel superior dispone de dos zonas laterales de aproximadamente 10,12 metros de ancho para la circulación de vehículos autorizados (un vano para cada sentido) y un tubo central de 13,1 metros, por donde discurrirá el *Automatic People Mover* (APM, transportador de pasajeros) (Figura 11). La parte inferior, con tres vanos de idénticas dime7nsiones, está destinada en su

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

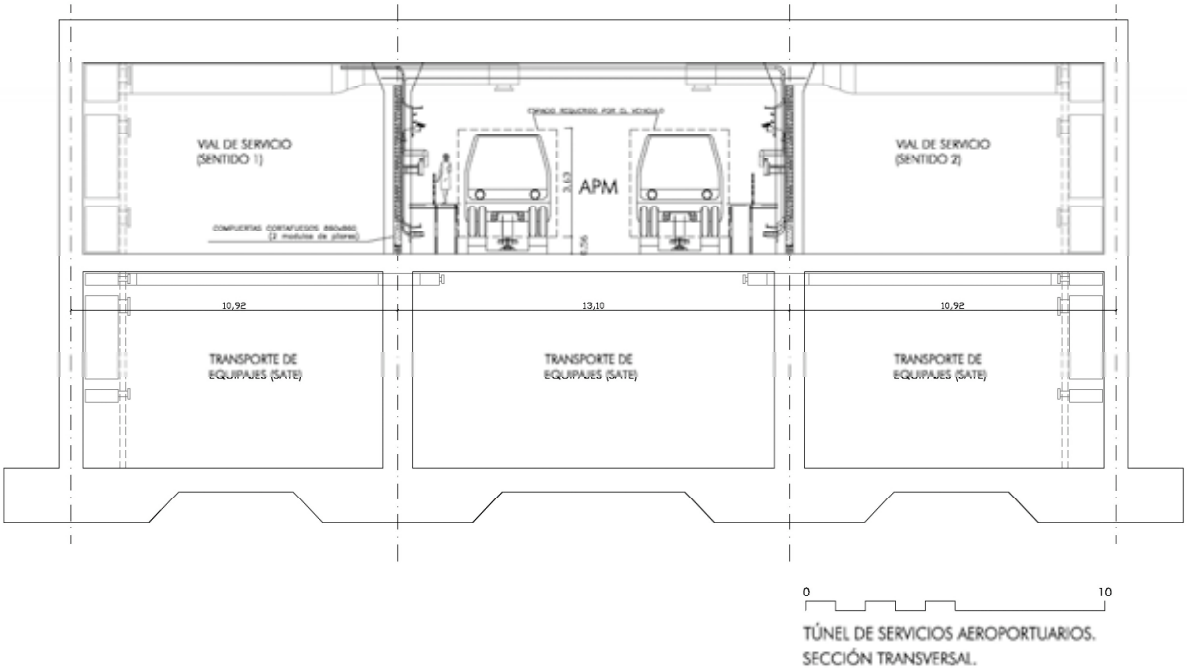


Figura 10. Sección transversal del túnel de conexión entre Terminal y Satélite.
Figure 10. Cross section of the tunnel connecting the Terminal and Satellite.

Figura 11. Estación del APM en el edificio Satélite.
Figure 11. APM station in the Satellite.

Figura 12. Sistema Automatizado de Tratamiento de Equipajes.
Figure 12. Automated Baggage Handling System.

median at level +2 in the pier such that boarding and disembarking can occur on different levels, with no interference with flows (Figure 9).

The distance between the Terminal and Satellite buildings (approximately 2 km) is due to aeronautical reasons such as the location and extension of the landing and take-off runways (existing and new). The two buildings are connected by a tunnel running under the runways. The tunnel has two floors with three spans or "tubes" each (Figure 10). The upper level has two side areas of approximately 10.12 metres wide for authorised vehicle traffic (one span for each direction) and a 13.1 metre central tube through which the Automatic People Mover (APM, passenger conveyor) runs (Figure 11). With three identically dimensioned spans, the lower part is earmarked in its entirety to the Automated Baggage Handling System (ABHS) (Figure 12).

Supplementary descriptions and other data on this building are available in [1], [4] and [5].

7. THE UNDULATING ROOF

The structural conception of the Barajas NTA is based on understanding the undulating roof as a lead play-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

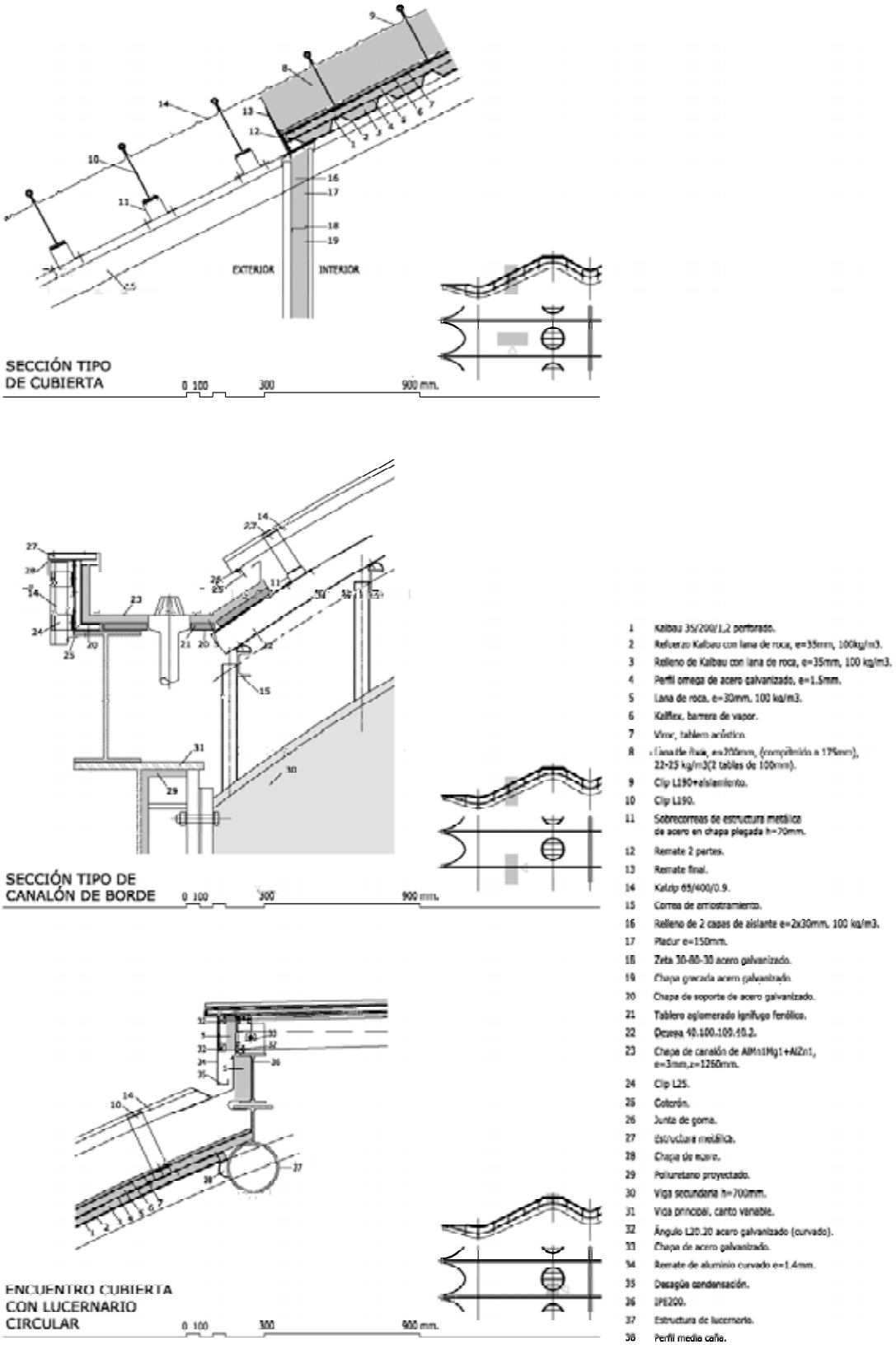


Figura 13. Detalles constructivos de cubierta.
Figure 13. Roof construction details.

er in the whole operation. In order to show the roof's depth and expression, it is formed by two separate surfaces that house the steel bearing structure inside. The outside skin, the cladding, houses the insulation functions (heat, water, acoustic, etc.) whilst the inside skin gives character and unity to the interior spaces. The north-south longitudinal dimension formed by 9m wide transversal sub-modules which assemble together until they cover the whole building (both Terminal and Satellite) predominates.

totalidad al Sistema Automatizado de Tratamiento de Equipajes (SATE) (Figura 12).

Descripciones complementarias y otros datos de este edificio pueden encontrarse en [1], [4] y [5].

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

7. LA CUBIERTA ONDULADA

La concepción estructural del NAT Barajas se basa en entender la cubierta ondulada como elemento protagonista de toda la actuación. Para mostrar el canto y la expresión de la cubierta, ésta se compone de dos superficies independientes que acogen en su interior la estructura portante de acero. La piel exterior, la de cubrición, es la que alberga las funciones de aislamiento (térmico, agua, acústico...), mientras que la piel interior es la que confiere carácter y unidad a los espacios interiores. Predomina la dimensión longitudinal (norte-sur) formada mediante submódulos transversales de una anchura de 9 m que se van ensamblando hasta cubrir todo el edificio (tanto Terminal como Satélite).

La estructura de cubierta se ha conformado mediante perfiles de acero laminado, de secciones específicas, todas ellas fabricadas en taller [3]. Una vez terminada toda la estructura, la cubierta se revistió exteriormente con el sistema de panel sándwich in situ *kalzip*, que consiste en dos láminas de aluminio nervadas, la inferior perforada para mejorar el aislamiento acústico del espacio interior, entre las que se intercalan diferentes capas, descritas por orden ascendente: fieltro de fibra, dos capas de aislamiento acústico de lana de roca de 35 y 30 mm, lamina autoadhesiva de betún elastómero a modo de barrera de vapor, aislamiento acústico *Viroc* de 16 mm y lámina de aislamiento térmico de lana de roca semirígida de 100+100, comprimiéndola durante la ejecución hasta 190 mm (Figura 13). Este elemento constructivo se ejecutó en obra por completo (no en taller). Respecto al color y textura de la chapa exterior, se tuvo especial cuidado en su definición para evitar deslumbramientos a los aviones (Figura 14).

La recogida de agua de cubierta se realiza por medio de un sistema sifónico de extracción. Debido a la particular geometría de la cubierta y la superficie a evacuar, se optó por un sistema sifónico autocebante de *Fullflow*, reduciendo el conjunto a 72 bajantes que recogen una superficie aproximada de 150.000 m^2. Fullflow sustituye las tuberías de PVC del sistema tradicional por una red de tuberías de polipropileno expandido de alta densidad, que funcionan a sección llena desde el nivel de cubierta hasta el suelo, lo que permite tener caudales a más velocidad y mas presión.

8. EL TECHO DE BAMBÚ

El techo de bambú representa el principal sistema unificador de todos los espacios interiores de Terminal y Satélite, convirtiéndose así en uno de los elementos más definitorios y singulares del proyecto. La elección final del bambú atendió a un exhaustivo proceso de estudio comparativo de diferentes

The roof structure has been shaped with rolled steel sections of a specific cross section, all factory made [3]. Once the structure had been finished, the roof was clad on the outside with the in situ sandwich panel system kal-zip, *which consists in two ribbed aluminium sheets, the lower one perforated to improve the inside area's acoustic insulation, between which different layers described in ascending order are interspersed: fibre felt, two layers of acoustic rock wool insulation of 35 and 30 mm, a self-adhesive elastomer bitumen sheet as a vapour barrier, 16 mm Viroc acoustic insulation and 100+100 semi-rigid rock wool heat insulation, compressing it during fitting to 190 mm (Figure 13). This construction element was completely on-site made (not factory). Special care was taken in defining the exterior sheet colour and texture so as to prevent dazzling aircraft (Figure 14).*

Roof water is collected by a siphon extraction system. Due to the particular geometry of the roof and area to be drained, a Fullflow self-*priming siphon system was chosen, reducing the overall to 72 downpipes collecting from an approximate area of 150,000 m^2.* Fullflow *replaces the traditional system's PVC pipes with a high density, expanded polypropylene pipe network working at full section from the roof level to the ground, allowing for faster, higher pressure flows.*

Figura 14. Cubierta de Terminal.
Figure 14. Terminal Roof.

8. THE BAMBOO CEILING

The bamboo ceiling represents the main system unifying all the Terminal's and Satellite's interior spaces thus becoming one of the design's most unique, defining elements. Bamboo as the final choice came from a thorough comparative study process involving different materials. Firstly, a series of aesthetic and architectural conditioning factors were presented; transmitting quality and friendliness to the passenger would be achieved with a material with a natural appearance. The use of some kind of wood would allow ceilings to be given textures and colourings in keeping with the interior ambience it was sought to create. Treatments of this wood (varnishes, impregnations, etc.) would have to provide matt shades, without gloss that might cause dazzle with the artificial lighting (Figure 15).

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 15. Bambú en zona de controles (Procesador, nivel +2).
Figure 15. Bamboo over checkpoints areas (Processor, level +2).

materiales. En primer lugar, se presentaban una serie de condicionantes estéticos y arquitectónicos; la transmisión de calidez y amabilidad hacia el viajero se conseguiría con un material de aspecto natural. La utilización de algún tipo de madera permitiría aportar a los techos unas texturas y coloraciones acordes con el ambiente interior que se pretendía crear. Los tratamientos de ésta madera (barnices, impregnaciones...) debían mantener tonos mate, sin brillos que pudieran ocasionar posibles deslumbramientos con la iluminación artificial (Figura 15).

Por otra parte, se buscaba que la utilización del material elegido no supusiese ningún tipo de agresión hacia el medioambiente (en consonancia con la preocupación por temas medioambientales que rige todo el proyecto). El bambú es una planta que, siendo productora de madera, tiene un crecimiento bastante rápido comparado con el de los árboles. De esta manera, el uso de madera de bambú (procedente de China) en una extensión tan grande como la requerida en el NAT Barajas no supone la devastación de ningún bosque.

Constructivamente, se presentaba la dificultad de encontrar un sistema que permitiese cubrir con madera una superficie de doble curvatura. Tras ejecutar varias muestras, finalmente se resolvió poner las lamas (de 100 mm de ancho) en posición perpendicular a las vigas principales de cubierta, con espacios intermedios entre tablas menores a 50 mm. Estos espacios intersticiales debían sumar al menos un 25% de la superficie del techo, debido a temas acústicos. El sonido debe poder traspasar el nivel del falso techo hasta llegar al intradós del sistema de cubrición, donde se dispone una chapa perforada que propicia la absorción de las ondas sonoras para evitar reverberaciones.

El método de colocación de las lamas fue diferente en Terminal y Satélite (por decisión de las diferentes empresas constructoras). En el edificio Terminal, se iban atornillando las tablas directamente sobre la estructura auxiliar de sujeción que se disponía sobre el intradós de la cubierta. Los extremos de las tablas quedan así montados sobre la parte superior de las alas inferiores de las vigas principales, ocultándose las posibles diferencias de longitud entre lamas. En Satélite, por el contrario, se

Moreover, it was intended that the use of the material chosen would not involve any type of aggression towards the environment (in consonance with concern felt for environmental issues governing the whole design). Bamboo is a plant which, being a wood producer, grows quite quickly compared with trees. Thus, using bamboo wood (originating from China) over an area as large as that required in the Barajas NTA did not involve devastating any forest.

Construction wise, the difficulty arose of finding a system allowing an area with a dual curvature to be clad with wood. After making several samples, it was finally decided to put bamboo slats (100 mm wide) in a position perpendicular to the roof's main beams, with intermediate spaces less than 50 mm between boards. These interstitial spaces had to total at least 25% of the ceiling's area, due to acoustic issues. Sound had to be able to pass through the false ceiling level until reaching the cladding system's soffit where a perforated sheet aiding the absorption of sound waves was fitted to prevent reverberations.

The slat fitting method was different in the Terminal and Satellite buildings (by a decision of the different construction companies). In the Terminal building, the boards were directly bolted onto the auxiliary securing structure fitted on the roof soffit. The ends of the boards were thus mounted on the top of the lower main beam flanges, hiding the possible differences in length between slats. On the other hand, in the Satellite building, slats were mounted at floor level onto galvanised steel structure modules. Once mounted, structure and slats were hoisted by small cranes to directly anchor them to the roof structure. In this case, the end of the boards do not rest on the main beam flanges due to a clearance being necessary between bamboo and beam to be able to fit the modules when hoisting and fitting them in position.

The design's unifying function that the bamboo ceiling has is strengthened by its prolongation beyond the limit as set by the glass façades. Thus, the bamboo cladding extends along the outer eaves of the buildings and the roof of the set down/pick up areas. This means that the bamboo called for two types of different treatment, one for the slats which are located in the climatised indoor ambience and the other for those subject to outdoor conditions (Figure 16).

The interior ambience has controlled, stable conditions of humidity (which helps wood). However, restrictions arise inside due to fire prevention. Fire resistance requirements according to the building's use are M1 classed (as per UNE 23727:1990 standard). In order to achieve these levels in the bam-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

iban montando las lamas a nivel de suelo sobre módulos de estructura de acero galvanizado. Una vez montadas, se elevaban -estructura y lamas- mediante pequeñas grúas, para anclarlos directamente a la estructura de cubierta. En este caso, el extremo de las tablas no llega a apoyar sobre las alas de las vigas principales, debido que era necesaria una holgura entre bambú y viga para poder encajar los módulos al elevarlos y colocarlos en su posición.

La función unificadora del proyecto que posee el techo de bambú se ve reforzada por su prolongación más allá del límite marcado por las fachadas acristaladas. De este modo, el recubrimiento de bambú se extiende por los aleros exteriores de los edificios y por la cubierta de las dársenas. Esto significa que el bambú necesita dos tipos de tratamientos distintos, uno para las lamas que se sitúan en el ambiente climatizado y otro para las que están sometidas a condiciones exteriores (Figura 16).

El ambiente interior cuenta con unas condiciones de humedad controladas y estables (lo cual beneficia a la madera). Sin embargo, en el interior se presentan las restricciones debidas a la protección contra incendios. Las exigencias de resistencia al fuego según el uso del edificio son de clasificación M1 (según norma UNE 23727:1990). Para alcanzar estos niveles en las lamas de bambú, hubo que someter al material a un proceso de laminado e impregnación en cada una de sus capas.

En el exterior (a excepción de las dársenas) los requerimientos de protección al fuego son algo menores que en el interior. No obstante, las lamas situadas en los aleros exteriores se encuentran expuestas a condiciones extremas de temperatura y sometidas a importantes cambios de humedad. Las variaciones de humedad hacen que la madera vea alterados fácilmente su forma y volumen, lo que repercute directamente en la durabilidad del material. Además, se prevé que las lamas puedan estar en contacto directo con agua líquida, con motivo de posibles condensaciones en la superficie del bambú. Para mitigar las agresiones del ambiente exterior, se ha sometido el material a un tratamiento especial. Éste consiste en un barnizado bicapa basado en resinas de poliuretano acrílico, el cual respeta los tonos mate de la textura natural del bambú, garantizando una correcta protección de la madera sin modificar sus cualidades estéticas.

La durabilidad del bambú (tanto para exterior como interior) está garantizada para unos 25 años, siempre que la madera no entre en contacto directo con el agua. También se asegura la durabilidad todos los tratamientos a los que ha sido sometido el bambú: encolado del laminado, fungicidas... etc. En principio el falso techo no requiere ningún tipo de

boo slats, the material had to be subjected to a lamnate and impregnation process in each of its layers.

Outdoors (except for the set down/pick up areas), fire prevention requirements are somewhat less than for indoors. Nevertheless, slats located in the outside eaves are exposed to extreme temperature conditions and subjected to heavy changes in humidity. Humidity variations make wood easily change in shape and volume which has a direct repercussion on the material's durability. In addition, the slats may well be in direct contact with liquid, due to possible condensation on the bamboo's surface. In order to mitigate aggression from the outdoor environment, the material was give a special treatment which consisted in a two layer varnishing based on acrylic polyurethane resins, respecting the matt shades of bamboo's natural texture and guaranteeing correct protection of the wood without altering its aesthetic qualities.

The bamboo's durability (both indoors and outdoors) is guaranteed for about 25 years, provided the wood does not come into direct contact with water. All the treatments given to the bamboo also ensure its durability: laminate glueing, fungicides, etc. Initially, the false ceiling does not call for any type of special maintenance, except for the mandatory regular inspections.

Figura 16. Bambú en los aleros exteriores.
Figure 16. Bamboo placed at outside eaves.

9. GLASS FAÇADES

The Terminal and Satellite buildings are enclosed by different types of curtain walls [3] [4]. The most extensive, complex one is the glass wall of the piers (Figure 17), which is formed by two parallel façades facing east and west. This curtain wall is divided into modules measuring 9 m wide by 14.5 m high (from the slab floor of level +1 to the roof), with a 3.000 x 2.615 m glass pane section in the lower strip (at the passenger's vision level) and 3.000 x 2.290 m in the rest.

The façade's structural function consists in traction working which is achieved with the interaction of a series of elements. Certain prestressed structural elements called kipper-trusses *are fitted, made up of 4 solid cast*

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

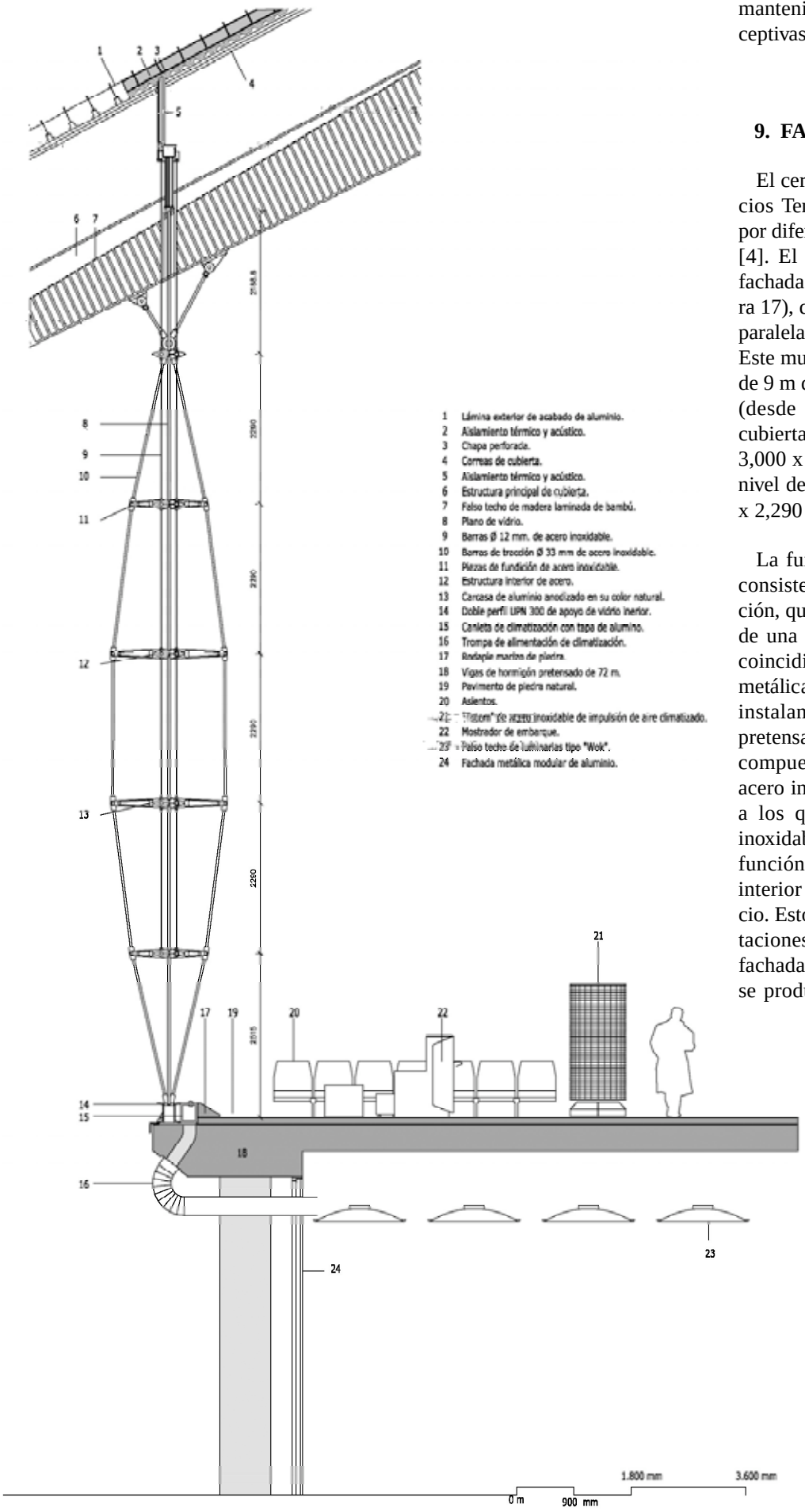


Figura 17. Sección constructiva de la fachada acristalada de los diques.
Figure 17. Construction section of the glazed façades at the piers.

mantenimiento especial, salvo las preceptivas revisiones periódicas.

9. FACHADAS ACRISTALADAS

El cerramiento completo de los edificios Terminal y Satélite se constituye por diferentes tipos de muros cortina [3] [4]. El más extenso y complejo es la fachada acristalada de los diques (Figura 17), que se compone de dos fachadas paralelas con orientaciones este y oeste. Este muro cortina se divide en módulos de 9 m de ancho, y una altura de 14,5 m (desde el forjado de nivel +1 hasta cubierta), con un despiece de vidrio de 3,000 x 2,615 m en la franja inferior (a nivel de la visión del pasajero) y 3,000 x 2,290 m en el resto.

La función estructural de la fachada consiste en un funcionamiento a tracción, que se consigue con la interacción de una serie de elementos. Cada 9 m, coincidiendo con los ejes de las vigas metálicas principales de cubierta, se instalan unos elementos estructurales pretensados denominados *kipper-truss*, compuestos por 4 brazos o bielas de acero inoxidable de fundición macizos, a los que acometen barras de acero inoxidable de diámetro 33 o 38 mm en función de su ubicación, tanto por el interior como por el exterior del edificio. Estos elementos soportan las solicitaciones de viento que acometen a la fachada y las presiones-succiones que se produzcan en la cubierta. El viento incide en los vidrios de fachada transmitiendo los esfuerzos a los travesaños horizontales y éstos a los *kipper-truss*. Los vidrios inferiores apoyan directamente sobre el forjado mediante una pieza formada por un doble UPN 300, y en el resto de los niveles sobre travesaños horizontales (Figura 18).

La idea estructural de los diques es la de un tubo pretensado rígido de 1´2 km de largo en Terminal y 940 m en Satélite [3] [4] y [6]. La estructura de cubierta, atirantada por las fachadas en sus extremos, produce un efecto de precompresión en los pilares dobles rectangulares situados en el centro

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

del dique. El pretensado de las fachadas hace que además éstas puedan asumir solicitaciones de compresión provenientes de la cubierta (hasta un límite teórico equivalente a la carga de pretensado). Se consigue un efecto parecido al que se produce cuando se tensa un arco para lanzar flechas; el arco es la viga principal, el tensor son las fachadas que la atirantan y el brazo comprimido que sujeta el arco está representado por los pilares centrales. Los pilares en "Y" pasan pues a tener la función de sustentación del alero exterior que forma la fachada y de atirantamiento de éste ante posibles succiones debidas al viento (Figura 19).

Figura 18. Dique de Terminal, con fachada acristalada.
Figure 18. Pier at Terminal Building, with glazed façade.

10. UN AEROPUERTO PARA EL SIGLO XXI

Las obras se finalizaron después de casi cinco años desde que se comenzara, siendo posible solventar en un tiempo récord todas las dificultades que conlleva la construcción de aproximadamente 1.100.000 m^2. Especialmente reseñable es el hecho de que se han llevado a cabo pocos cambios con respecto al diseño y conceptos originales desarrollados en el concurso, lo que da una idea del acierto que fue tomar como punto de partida la idea de flexibilizar en todo momento el proyecto, el cual se ha mantenido fiel a sí mismo a pesar de las evoluciones que ha sufrido durante su desarrollo y ejecución material (Figura 20).

Como imagen de aeropuerto del siglo XXI, la Nueva Terminal de Barajas será operativa, sencilla, económica y funcional, capaz de absorber el aumento que está experimentando el tráfico de pasajeros, que podrá ser del orden de 50 millones anuales en 2010 y de 70 millones en 2020 con lo que el Nuevo Barajas doblará la capacidad del antiguo aeropuerto. Desde principios de 2006 están llegando viajeros al nuevo Barajas, el cual verá pasar cada día por su interior el equivalente a la población de la ciudad de Cáceres cuando alcance su pleno rendimiento. Se encuentra a tan

stainless steel arms or reinforcement bars to which stainless steel, 33 or 38 mm bars are connected, depending on their location, both inside and outside the building, every 9 m, coinciding with the roof's main beam axes. These elements withstand wind stresses attacking the façade and the pressures/suctions occurring in the roof. The wind blows on the façade's glass transmitting stresses to the horizontal cross members and the latter to the kipper-trusses. *The lower glass rests directly on the slab floor via a piece formed by a double UPN 300, and on horizontal*

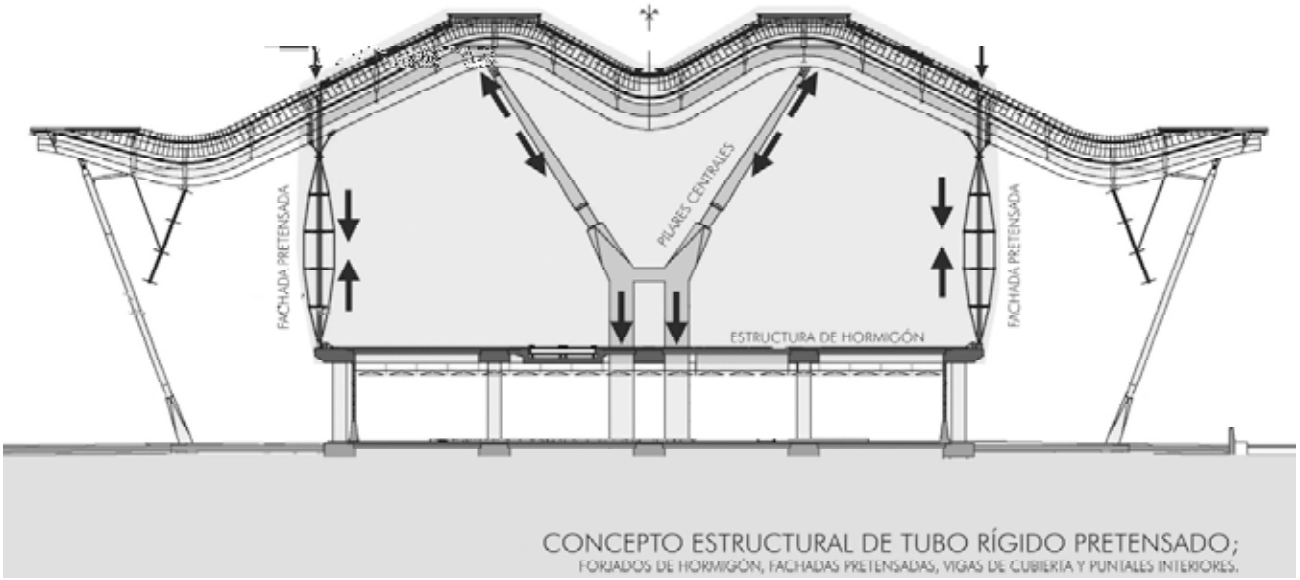


Figura 19. Funcionamiento estructural del dique.
Figure 19. Structural workings of the piers.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

cross members on the rest of the levels (Figure 18).

The structural idea of the concourses is that of a prestressed, rigid tube, 1.2 km long in the Terminal and 940 m in the Satellite [3] [4] [6]. The roof structure, stayed by the façades at its ends, produces a precompression effect in the double rectangular pillars located in the centre of the concourse. The prestressing of the façades also allows the latter to take on the compression stresses from the roof (up to a theoretical limit equivalent to the prestressing load). An effect similar to that occurring when a bow is drawn back (tensioned) to shoot arrows is obtained; the bow is the main beam, the tensor is the façades staying it and the compressed arm holding the bow is represented by the central pillars. The "Y" pillars thus have the function of sustaining the outside eave forming the façade and staying it against possible wind suctions (Figure 19).

10. A 21ST CENTURY AIRPORT

Work concluded almost five years after it commenced and it was possible to overcome all the difficulties involved in building approximately 1,100,000 m2 in record time. Particular mention must be made of the fact that few changes were made to the original design and concepts developed in the tender, which gives an idea of how right it was to take as starting criteria the idea of making the design flexible at all times and keeping it faithful to itself despite the evolutions it underwent during its undertaking and actual performance (Figure 20).

As an image of a 21st century airport, the New Barajas Terminal will be operational, simple, economical and functional, able to absorb the increase passenger traffic is undergoing which may well be in the order of 50 million a year in 2010 and 70 million in 2020 with which the New Barajas will double the old airport's capacity. Travellers have been arriving at the new Barajas as from the beginning of 2006 and the equivalent of the population of the city of Cáceres will be passing through it every day when it comes into full operation. It is only 3 kilometres from the old terminals and 15 minutes by underground railway from the city centre. Its exceptional location is a whole luxury for Madrid.

REFERENCES

[1] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: "Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[2] Fernel Fernández, José Pedro: "Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[3] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: "Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[4] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: "Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[5] Fernel Fernández, José Pedro: "Edificio Satélite de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

[6] Peña Pascual, José Manuel: "Tesado multipunto de la fachada del Edificio Terminal". Hormigón y Acero no. 239, 1st quarter 2006.

sólo tres kilómetros de las antiguas terminales, y a 15 minutos en metro del centro urbano. Su privilegiada situación supone todo un lujo para Madrid.

REFERENCIAS

[1] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: "Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Fernel Fernández, José Pedro: "Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: "Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: "Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[5] Fernel Fernández, José Pedro: "Edificio Satélite de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[6] Peña Pascual, José Manuel: "Tesado multipunto de la fachada del Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Figura 20. Extremo sur del dique de edificio Terminal.
Figure 20. South end of the pier at Terminal building.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal

Conceptual design, construction project and technical assistance for the concrete works of the buildings and infrastructures of the new Terminal Area

Hugo Corres Peiretti

José Romo Martín

Alejandro Pérez Caldentey

Eduardo Romero Rey

FHECOR Ingenieros Consutores[1]

RESUMEN

En este trabajo se presentan la concepción estructural y diferentes aspectos específicos de las estructuras de los edificios e infraestructuras de la Nueva Área Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas. Se trata de una obra de grandes dimensiones y ejecutada en un tiempo muy reducido, lo que ha condicionado fuertemente la elección de las soluciones estructurales adoptadas. En esta obra se han utilizado sistemas propios de obra civil para ejecutar una obra de edificación. Asimismo se han utilizado detalles de edificación como solución idónea para las estructuras de puentes de acceso al edificio proyectados. Es una obra en la que se han utilizado distintos materiales estructurales: hormigón estructural (armado, débilmente armado, pretensado, *in situ* y prefabricado), estructura metálica y mixta, materiales textiles y vidrio.

Palabras Clave: Aeropuerto, Barajas, hormigón estructural, conectores de cortante de gran capacidad, estructuras integrales sin juntas.

SUMMARY

This paper presents the conceptual design and various specific aspects of the structures and infrastructures of the New Terminal Area of Madrid - Barajas Airport. The large dimension of the project and the reduced time of construction have strongly conditioned the choice of the various structural solutions adopted. Construction systems typically used in bridges have been used for the structure of this building. Similarly, building details have been used as ideal solutions for the bridges which were designed for the access to the building. Several structural materials have been used in this project: Structural concrete (normal reinforced, slightly reinforced, pre-stressed, as well as pre-cast and in-situ), steel, composite structures and textile and glass structures.

Key words: *Airport, Barajas, structural concrete, shear connections, structures without joints, integral structures.*

1. INTRODUCCIÓN

Las obras de la Nueva Área Terminal del Aeropuerto de Madrid – Barajas comprenden una serie de edificios e infraestructuras que constituyen una de las obras más importantes de Europa en los últimos tiempos. La obra incluye el Edificio Terminal, el Edificio Satélite, un gran aparcamiento y una red viaria de acceso con diferentes estructuras y viaductos (Figura 1).

El proyecto arquitectónico fue adjudicado en un concurso internacional al equipo formado por Richard Rogers y Lamela. Para su construcción, la obra se dividió en tres partes: el Edificio Terminal fue adjudicado a una UTE formada por FCC, FERROVIAL-AGROMÁN, ACS, ACCIONA Infraestructuras y SACYR

[1] Durante todo este período, además de los autores de este artículo, han participado, por parte de FHECOR Ingenieros Consultores, las siguientes personas: Jorge Calvo Benítez, Niklas Johansson, José Manuel Gómez Barranco, Ramón López Mendizábal, Mariano Martín Cañueto, Raúl Monterroso Cabello, Virginia Moreno Fernández, Jorge Torrico Liz, Álvaro Ruiz Herranz y Daniel Ventín Jiménez.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 1. Vista general de las obras.

(UTE Barajas), el Edificio Satélite fue adjudicado a una UTE formada por DRAGADOS y OHL y el aparcamiento, estructuras de conexión con el Edificio Terminal y estructuras de acceso fueron adjudicadas a DRAGADOS. La propiedad de la obra corresponde a AENA, siendo Jesús Mendiluce el Director del Proyecto.

Durante el período de desarrollo del proyecto, las estructuras fueron planteadas a nivel básico por OTEP Internacional y por HCA. En esta etapa, FHECOR Ingenieros Consultores actuó como asesor de AENA para el control del proyecto básico realizado.

Después de la adjudicación de las obras, los constructores fueron los encargados, según se exigía en el pliego del concurso, de desarrollar el proyecto de construcción de las estructuras. En esta etapa FHECOR Ingenieros Consultores realizó el estudio de alternativas y la propuesta de solución para todas las estructuras, excepto cubierta y fachadas, de los distintos edificios e infraestructuras construidos. FHECOR Ingenieros Consultores ha realizado, asimismo, el proyecto de construcción de todas estas estructuras, excepto del Edificio Terminal, del que Proyectos de Ingeniería y Arquitectura SL[2] desarrolló parte del proyecto de construcción. Asimismo se realizó una asistencia técnica a la obra durante toda la ejecución.

A continuación se describe la solución adoptada para cada tipo de estructura, los aspectos más relevantes del proyecto de construcción, los ensayos específicos realizados para el estudio de algunos aspectos especiales y el seguimiento del comportamiento in situ de algunos elementos estructurales.

2. Durante todo este período, por parte de Proyecto de Ingeniería y Arquitectura, S.L., han participado las siguientes personas: José Mª Fernández Álvarez, José Ignacio Fernández López y Pilar Fernández López.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

2. EDIFICIO TERMINAL

El Edificio Terminal del NAT Barajas ocupa en planta una superficie aproximada de 125.000 m^2 y se distribuye en una zona central, de 360,00 x 216,00 m, y dos diques laterales, de 396,0 x 54,0 m cada uno. A su vez, este edificio consta de 6 niveles sobre el nivel de cimentación, el nivel –2 a la cota –14,00, el nivel –1 a la cota –8,50 , el nivel 0 a cota de rasante, el nivel +1 a la cota +5,675 y el nivel +2 a la cota +10,575. En total el edificio tiene 470.261 m^2 (Figura 2).

Figura 2. Vista general del Edificio Terminal.

2.1. Estudio de alternativas y descripción de la solución estructural propuesta

La solución estructural del proyecto básico establecía una serie de restricciones inamovibles. Por un lado, una malla de pilares de 9,00 x 18,00 m. Las luces mayores están orientadas en la dirección larga del edifico y las luces menores en la perpendicular. El proyecto básico estaba muy modulado e imponía una serie de exigencias adicionales relativas a las dimensiones máximas de los distintos elementos estructurales.

Otro condicionante muy importante era el reducidísimo plazo de ejecución disponible.

Durante la primera etapa de estudio se plantearon soluciones híbridas, *in situ* - prefabricadas, con nudos *in situ*. Estas soluciones presentaban el inconveniente de requerir unos medios de elevación muy potentes para mover elementos prefabricados de mucho peso en un edificio de grandes dimensiones [13].

La solución finalmente adoptada fue *in situ*, muy semejante a la planteada en el proyecto básico y está constituida por pórticos, de distintos números de plantas dependiendo de los niveles existentes en las distintas partes del edificio, de 72,00 m de longitud, generalmente.

Los pórticos están constituidos por vigas pretensadas con armaduras postesas de 18,00 m de luz, comprenden normalmente cinco pilares y se disponen juntas con conectadores de cortante a un quinto de la luz.

Las vigas postesadas tienen unas dimensiones de 1,80 m de ancho y 0,90 m de canto, en las plantas bajo rasante, y de 0,80 m en las plantas +1 y +2. Las vigas de los pórticos interiores tienen sección rectangular y las de borde tienen una forma trapezoidal especial, para recibir la fachada y una iluminación embebida en el hormigón [13].

Los pilares son de hormigón armado, de sección circular en todas las alineaciones excepto en las centrales de cada módulo de 72,00 x 72,00 m, donde se apoya la cubierta. En este caso se dispone un par de pilares rectangulares unidos por un dintel transversal, a nivel de cada planta, que permite el apoyo de la viga.

En el sentido perpendicular a los pórticos, se han proyectado losas alveolares. En general son placas alveolares pretensadas de 0,20 m de espesor con capa de compresión de 0,10 m y luces de 7,20 m.

La estabilidad longitudinal está asegurada por los pórticos. La estabilidad transversal se asegura con unos pórticos trans-

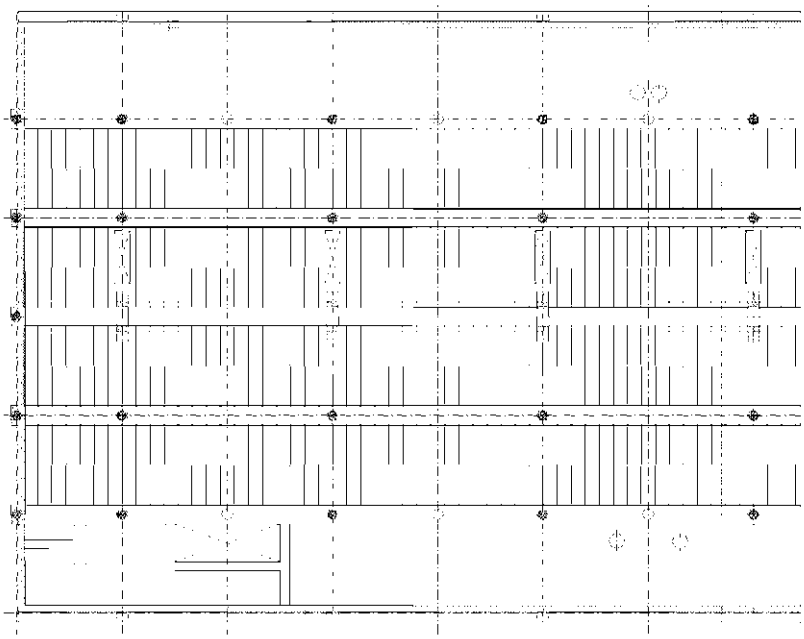


Figura 3. Planteamiento general de la cuadricula de pilares en la zona de los diques de Edificio Terminal.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 4. Sección transversal de la estructura.

versales que tienen una rigidez importante debido a los pilares dobles especiales de apoyo de la cubierta (Figura 4).

Como se ha dicho, a la hora de resolver la estructura del Edificio Terminal uno de los condicionantes básicos fue el plazo de ejecución, lo que comportaba la necesidad de establecer un procedimiento constructivo muy ágil, flexible y rápido. Teniendo en cuenta la gran cantidad de metros lineales de viga y metros cuadrados de forjado a ejecutar, la selección de la solución estructural descrita más arriba fue hecha contemplando el proceso constructivo más idóneo para conseguir los plazos de ejecución exigidos.

Parecía razonable tratar de diferenciar claramente la ejecución de pilares y vigas de la ejecución del forjado. De esta manera, teniendo ejecutados los pórticos antes de colocar las placas de forjado, se elimina la necesidad de disponer de grandes superficies cimbradas y se permitía el avance de distintas actividades independientemente.

Por otro lado, al considerar el procedimiento de ejecución de las vigas, teniendo en cuenta que el peso propio supone aproximadamente el 20% de la solicitación total, se pensó en separar las etapas de encofrado, ferrallado y hormigonado, de la etapa de tesado. Es decir, se planteó el funcionamiento de las vigas como de hormigón armado, para la acción de peso propio. Posteriormente se aplicaría el pretensado concomitante sólo con las cargas de peso propio de la viga para, por último, terminar la ejecución del forjado y aplicar el resto de cargas: peso del forjado, cargas muertas y sobrecargas.

Los autores de este artículo no pueden dejar de resaltar la enorme importancia del procedimiento constructivo, que constituía un condicionante del proyecto que no siempre fue entendido por los propios constructores durante la fase de discusión. Especialmente dura fue la tarea de que los técnicos acostumbrados a la edificación más o menos convencional asumieran tantas cosas novedosas. Esa experiencia constituyó una lección recíprocamente enriquecedora: los proyectistas, acostumbrados a las pautas establecidas para las estructuras de edificación, deben entender la trascendental importancia que, en casos como éste, tienen los procesos constructivos, en los que pueden y deben tomar iniciativas que contribuyan, en colaboración con los constructores, a una correcta y eficaz ejecución. También los constructores, habituados a formas de hacer convencionales, deben hacer un esfuerzo, como se hizo aquí, para abrir su mente a posibilidades diferentes y válidas. La solución ejecutada finalmente siguió el siguiente proceso:

A. Ejecución de los pilares. Se adoptaron criterios de proyecto pensados para minimizar los cambios de ferralla y compatibilizar fácilmente la armadura de los pilares con la de las vigas pretensadas con armadura postesa.

B. Utilización de un encofrado autoportante, aprovechando que los pórticos se encuentran perfectamente alineados en grandes longitudes. Este procedimiento, muy común en la ejecución de puentes, no se aplica normalmente en edificación. En este caso, durante la ejecución, las cargas son muy pequeñas en comparación con las actuantes en la construcción de puentes, en los que el peso propio es muy importante, y por lo tanto la viga lanzadora y los medios para producir el movimiento son muy manejables (Figura 5.1.).

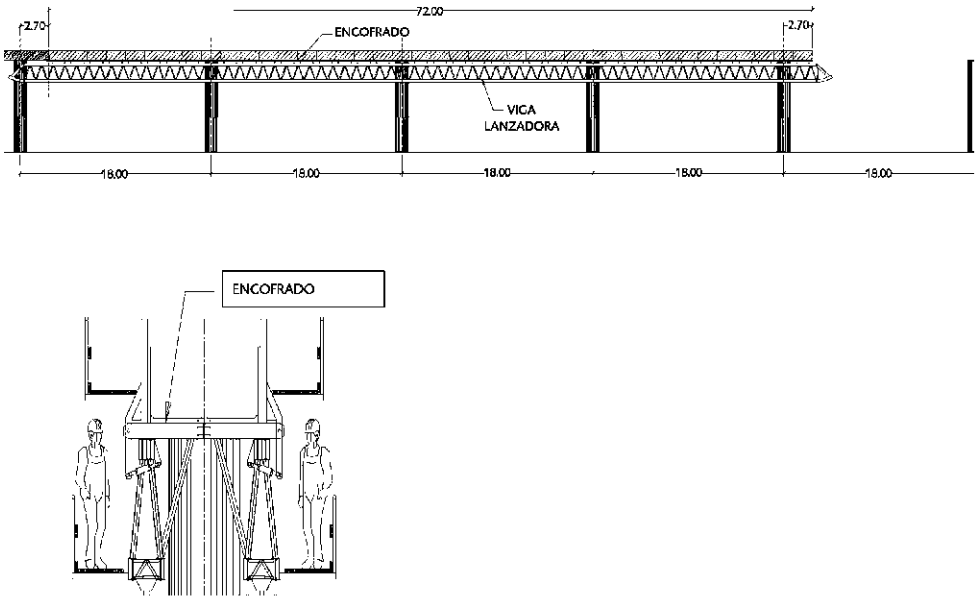


Figura 5.1 Proceso constructivo, encofrado autoportante para la construcción de las vigas pretensadas con armadura postesa en los pórticos.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

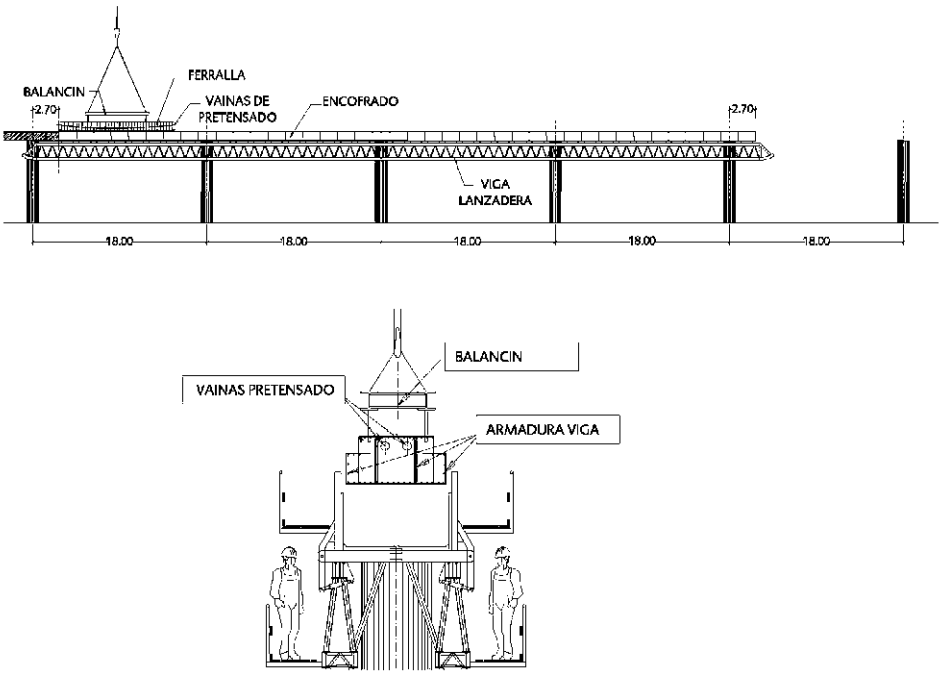


Figura 5.2 Proceso constructivo, montaje de la armadura activa y pasiva.

Durante la construcción se utilizaron encofrados autolanzables para las vigas de borde y encofrados con castilletes móviles para las vigas interiores.

C. Estudio de la ferralla para facilitar su elaboración y colocación. Las limitaciones impuestas por la arquitectura a las dimensiones máximas de las vigas hacía que la ferralla fuera muy densa, en general, y especialmente densa en las zonas de las juntas de dilatación. Se estudió el uso de una ferralla muy modular y tipificada, para facilitar su elaboración y un control de calidad adecuado. La armadura activa tenía un problema similar. Se decidió utilizar un número mínimo de cables que facilitaran su ejecución y replanteo. Esta elección obligó a arbitrar todos los mecanismos posibles para un control adecuado del pretensado y evitar incidencias en el control de la fuerza de tesado durante la ejecución. Merece la pena destacar que en este proceso de racionalización prevaleció el afán de conseguir calidad y eficacia sobre el del aparente beneficio por ahorro de cuantías (Figura 5.2.).

D. Hormigonado de las vigas. En esta etapa se hormigonaba la viga con una sección transversal casi completa. Con la intención de acelerar el proceso constructivo e independizar una actividad de la siguiente, el diseño de la sección transversal de las vigas era tal que, en primera fase, permitiera su hormigonado y descimbrado de tal forma que funcionara, frente a las cargas de su peso propio, como una viga de hormigón armado. En segunda fase, las secciones dimensionadas deberían permitir la introducción del pretensado y, en última fase, soportar el montaje de las placas y el hormigonado posterior de la losa superior, que completaba la sección transversal de la viga (Figura 5.3) [13].

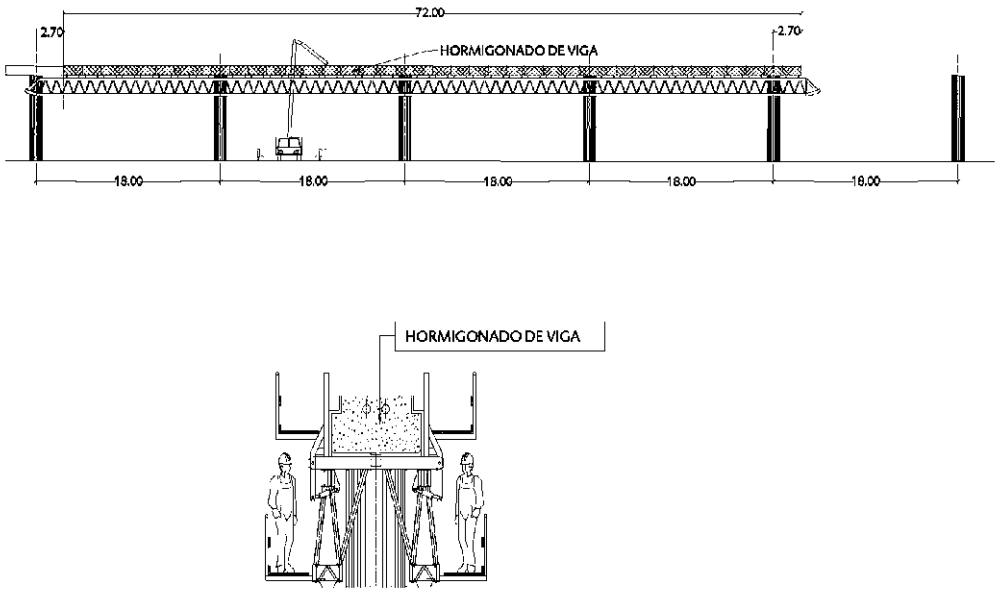


Figura 5.3. Proceso constructivo, hormigonado de la viga del pórtico con una sección transversal compatible con el postesado y la construcción posterior de los forjados.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

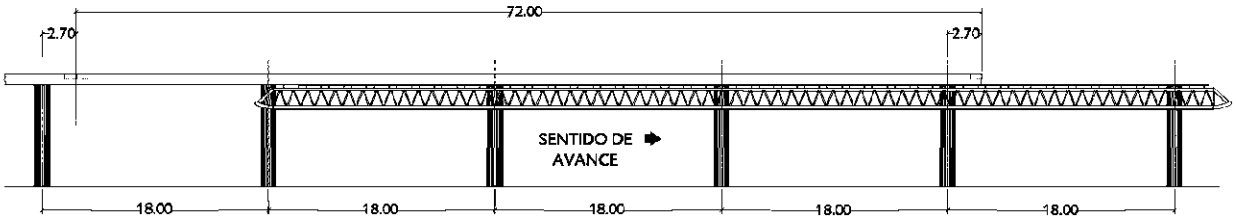


Figura 5.4. Proceso constructivo, descimbrado y movimiento del encofrado autoportante para su posterior utilización en el pórtico siguiente.

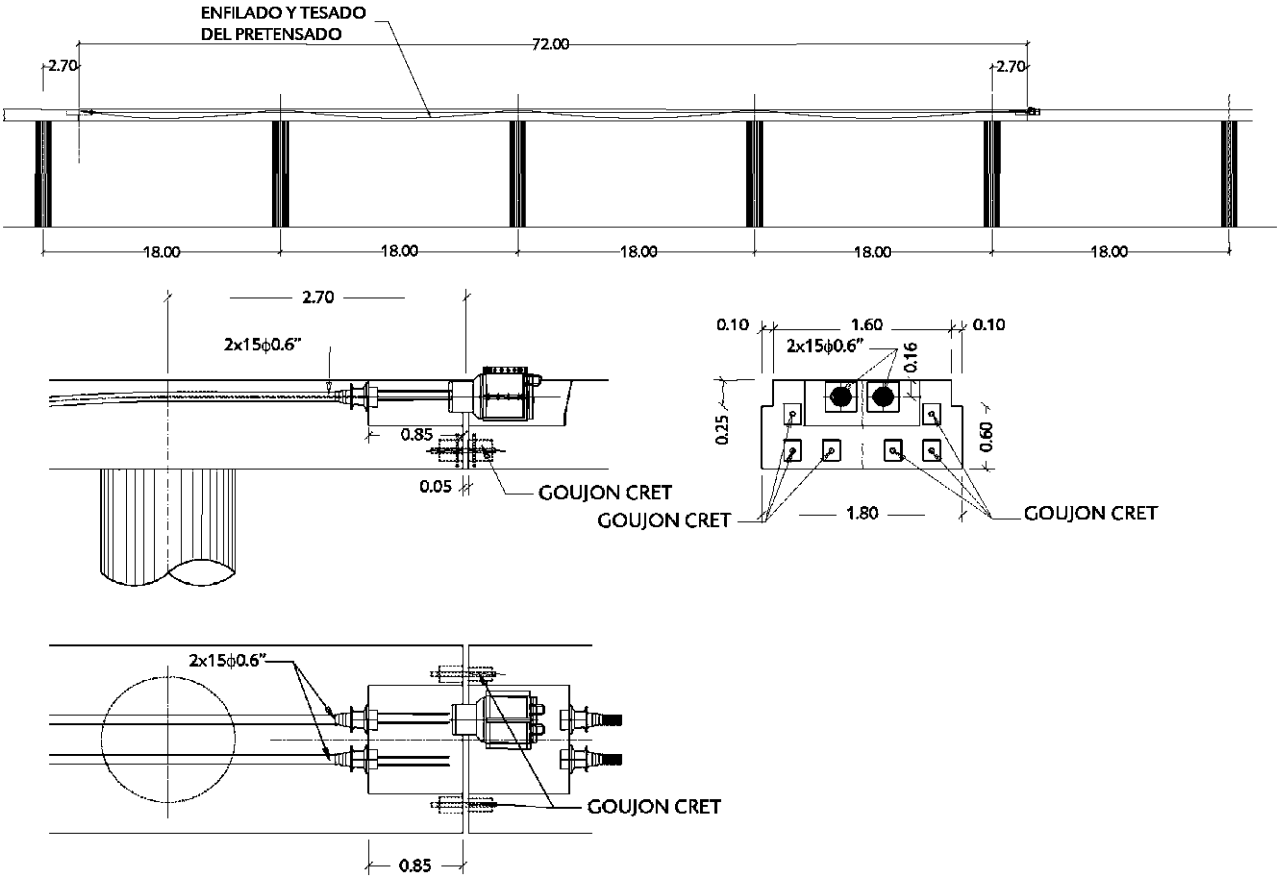


Figura 5.5. Enfilado y tesado de los tendones de pretensado.

E. Desencofrado de la viga de hormigón armado a la edad más temprana posible, compatible con una resistencia mínima del hormigón, y movimiento del encofrado autoportante para su posterior utilización en los pórticos siguientes (Figura 5.4.).

F. Enfilado y tesado de los tendones de las vigas pretensadas con armadura postesa (Figura 5.5).

G. Ejecución del forjado, es decir, montaje de las placas alveolares, que se apoyan directamente sobre las vigas de los pórticos, y hormigonado de la capa de compresión, tras la colocación del mallazo (Figura 5.6.)

H. Inyección de las vainas de pretensado, previamente sellados los cajeados de los anclajes con el hormigón de la capa de compresión del forjado (Figura 5.7).

2.2. Aspectos especiales del proyecto de construcción

La solución propuesta presenta aspectos especiales que se abordan en este apartado.

En primer lugar los pórticos longitudinales tienen, como se ha dicho, 72,00 m de longitud con nudos monolíticos y vigas pretensadas con armaduras postesas. Esto implicó un **estudio adecuado de las deformaciones impuestas, de temperatura y retracción**.

En consecuencia, resultaba necesario evaluar los esfuerzos que se generan por estos efectos, especialmente en una estructura tan larga como la de este edificio. Este aspecto es particularmente importante porque la normativa vigente en edificación limita extraordinaria e innecesariamente la longitud de los edificios y no proporciona criterios para el proyecto de estructuras de mayor longitud. Además, debido a las conexiones entre pórticos a quintos de la luz con elementos especiales de transmisión de cortante, resultaba imprescindible evaluar de forma adecuada las deformaciones de los extremos de los pórticos por los distintos efectos y especialmente por las deformaciones impuestas.

Para el tratamiento de las deformaciones impuestas sobre la estructura, debidas a retracción y temperatura, se utilizaron las siguientes hipótesis.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

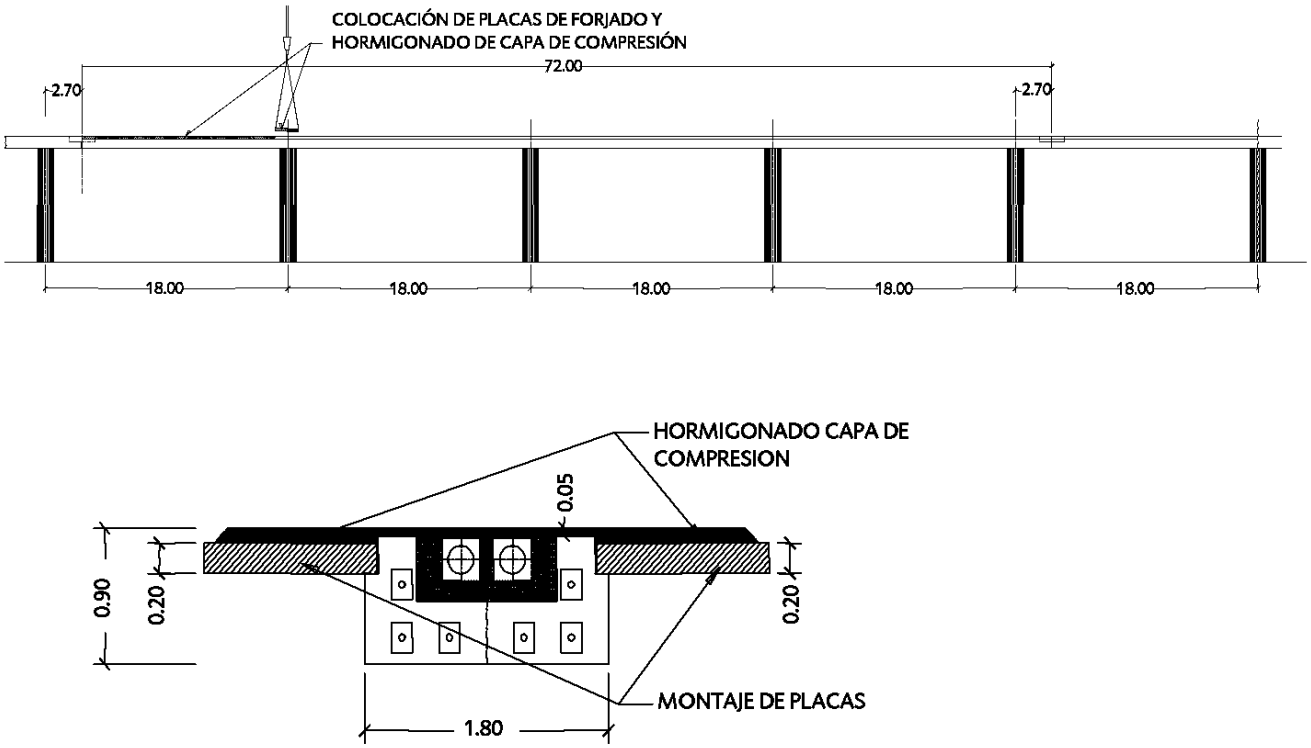


Figura 5.6. Proceso constructivo, instalación de las losas alveolares, colocación de la malla de reparto y hormigonado de la losa de compresión.

Para el control de la fisuración en la situación en servicio para el estado cuasipermanente, se utilizó un modelo de pórtico con secciones no fisuradas y se estudió el efecto de la citada combinación cuasipermanente de cargas exteriores y, además, el efecto de una variación uniforme de temperatura, así como el efecto de la retracción impuesta, en valor reducido por la disminución del módulo de deformación longitudinal del hormigón por fluencia. Para estas hipótesis, del lado de la seguridad porque no tienen en cuenta la reducción de la rigidez de los pilares debido a la fisuración, se comprobó la fisuración de vigas y pilares. La situación más desfavorable se presentaba en los pilares, a los que, en algún caso, fue necesario aumentar las armaduras, por encima de los requerimientos en Estado Límite Último. Las vigas parcialmente pretensadas con armaduras postesas no presentaban problemas de fisuración.

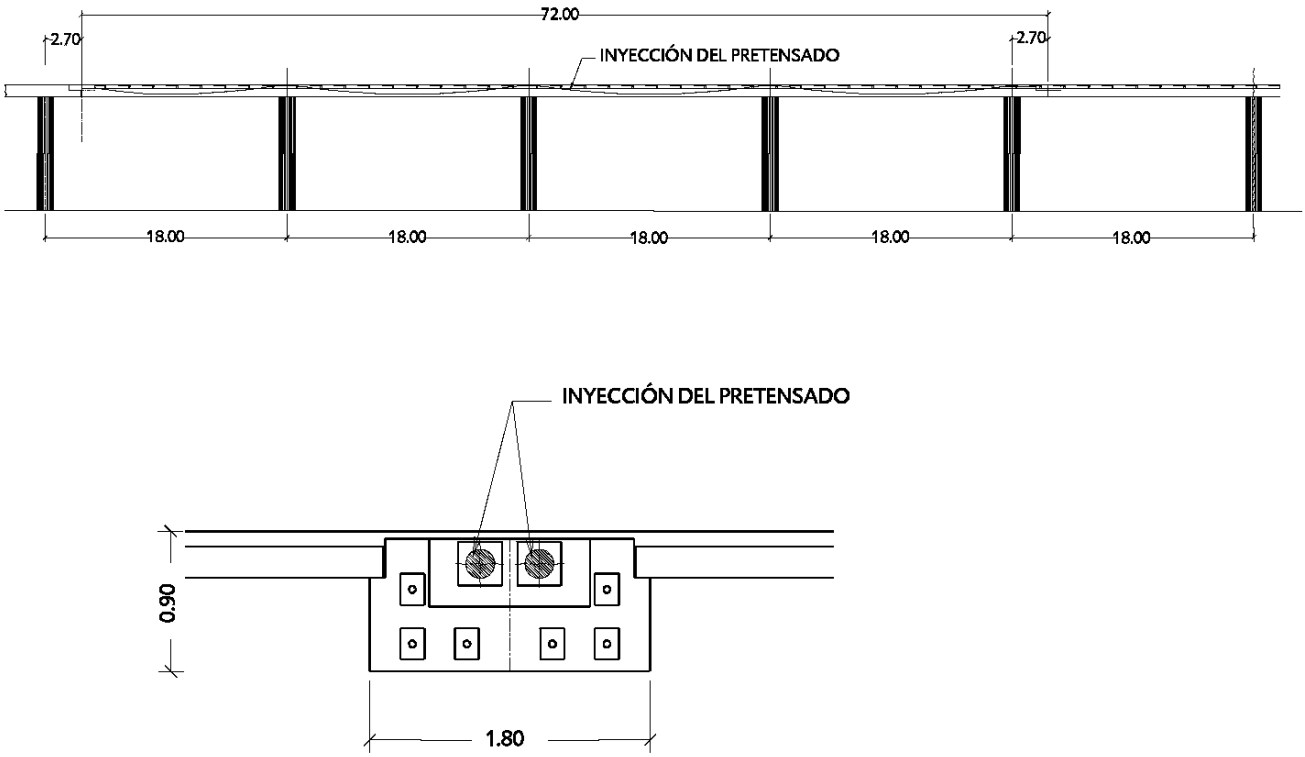


Figura 5.7. Proceso constructivo, inyección de los tendones de pretensado.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Para la evaluación de las deformaciones máximas en las juntas se utilizó el mismo modelo anterior, pero con secciones fisuradas para los pilares. En este caso la pérdida de rigidez de los pilares resta rigidez al sistema, pues atenúa la magnitud de la coacción al acortamiento que imponen los pilares y da, por tanto, conservadoramente, una cota superior de la abertura máxima de las juntas. No obstante, para tener en cuenta otras incertidumbres no consideradas explícitamente, y dada al importancia de este dato en el diseño de las juntas, se consideró un coeficiente de seguridad de 1,25, tal como suele utilizarse en puentes para la determinación de la longitud de juntas de dilatación, que se aplicó a la deformación estimada con las hipótesis descritas anteriormente.

Para las comprobaciones en Estado Límite Último se utilizó el mismo modelo anterior y se consideraron las combinaciones y coeficientes de mayoración habituales en ELU, solo que para los esfuerzos inducidos por las deformaciones impuestas, retracción y temperatura, se utilizó un coeficiente de mayoración igual a la unidad. Esta hipótesis también queda del lado de la seguridad porque desprecia la pérdida de rigidez que se produce en los pilares, para este estado de cargas, y, por lo tanto, desprecia conservadoramente el efecto que se produce de disipación de esfuerzos debidos a las deformaciones impuestas.

Para estos cálculos se ha considerado una variación de temperatura uniforme de 20º C y una deformación de retracción de 350 $\mu\varepsilon$. Para tener en cuenta el efecto de la fluencia, se consideró el método de Trost. Por facilidad operativa, los cálculos fueros realizados considerando siempre un mismo módulo de deformación instantáneo del hormigón, válido para todas las cargas gravitatorias y para la temperatura. Para tener en cuenta la reducción del módulo de deformación longitudinal del hormigón por fluencia, se consideró una retracción reducida en la proporción $(1+\chi\phi)$, que es lo que se reduce el módulo de deformación longitudinal.

La decisión de realizar pórticos monolíticos ha exigido un **estudio de la organización de la ferralla de los pilares**, con el fin de garantizar la compatibilidad de la armadura pasiva con la activa de las vigas pretensadas con armadura postesa [1]. En la Figura 6 se muestran los detalles adoptados. Como se ha dicho, los pilares eran en su mayoría circulares, de distintos diámetros.

Las vigas pretensadas, para minimizar las operaciones de pretensado, **se proyectaron con sólo dos tendones de 15 cordones de 0,6" cada uno**. Esta solución facilitó los detalles de armado, el control de la ejecución de la ferralla, el hormigonado, el enfilado y el tesado de los tendones. En contrapartida, la existencia de sólo dos tendones obligó a preparar un procedimiento muy estricto para evitar problemas en cuanto a la obtención de la fuerza de pretensado. Un error en la fuerza de tesado de cualquiera de los dos cables, suponía un error en el 50 % del pretensado.

Otro detalle muy importante fue la definición de **la zona de la junta de dilatación**. Por una parte, había que transmitir un cortante muy importante y permitir desplazamientos horizontales también grandes en las juntas. Por otra parte, la junta debía alojar los anclajes de pretensado de las dos vigas adyacentes y permitir el posicionamiento de los gatos de tesado de los tendones. Todas estas exigencias funcionales obligaron a una serie de estudios y ensayos que permitieron obtener la solución finalmente utilizada.

El detalle de estas juntas comprendió los siguientes aspectos:

A. Estudio de las dimensiones de los cajeados para alojamiento de los gatos de pretensado. Se partió inicialmente de las características geométricas de un suministrador de pretensado pero inmediatamente, debido a la magnitud de la obra y que estaban subcontratados prácticamente todos los sistemas comerciales disponibles en el mercado, hubo que ajustar la geometría a todos ellos, que tienen diferencias no despreciables.

B. Trazado de los cables en los extremos de las vigas adyacentes. En un extremo la viga es un voladizo de 2,70 m y en el otro un vano extremo de 15,30 m. En ambos elementos el trazado es diferente y debe hacerse compatible con las necesidades de la junta.

C. La transmisión de 1.400 kN de cortante y la necesidad de permitir los movimientos de 0,070 m en la junta. Como puede verse en la Figura 7.1, para el caso de la

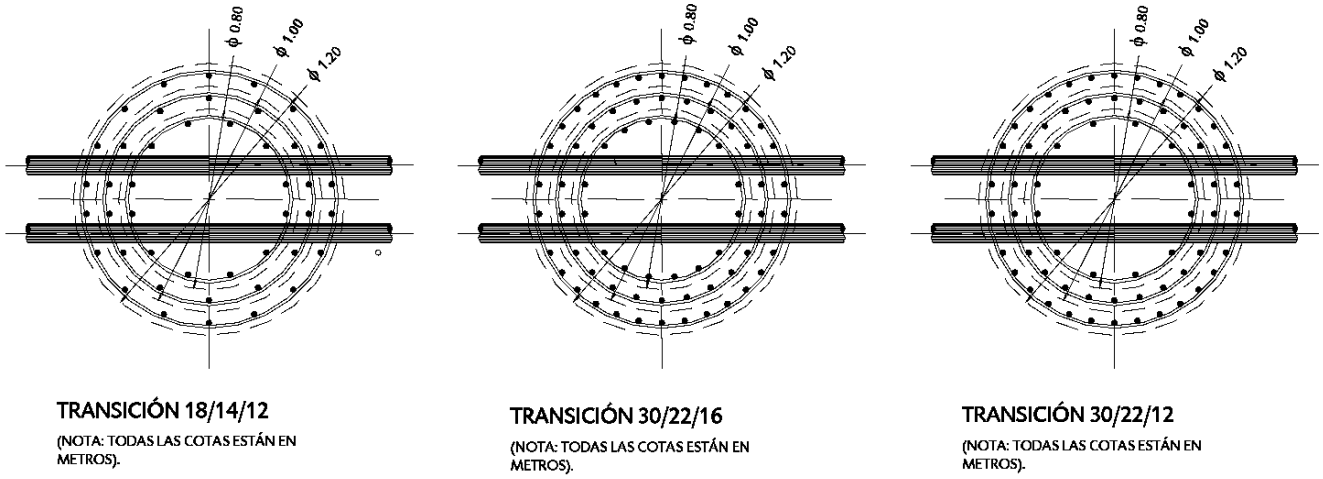


Figura 6. Armadura de los pilares y compatibilidad con las vainas de los cables de postesado de las vigas.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

junta típica ya que había otras juntas especiales más solicitadas, se adoptaron siete conectadores de gran capacidad, dispuestos en dos filas. En la parte superior se situaron dos, a ambos lados del cajeado dejado para alojar los gatos y cinco en la zona inferior.

D. Disposición de la armadura pasiva en el extremo de viga. La armadura pasiva debía permitir resolver distintos problemas: los esfuerzos locales de la zona de anclajes del pretensado, la transmisión de la carga de los conectores y los esfuerzos propios de la viga en la zona de la junta.

En las Figuras 7.1 a 7.3 se muestran el detalle de la armadura de la junta típica, una foto de la ferralla y una foto de la zona de la junta parcialmente ejecutada.

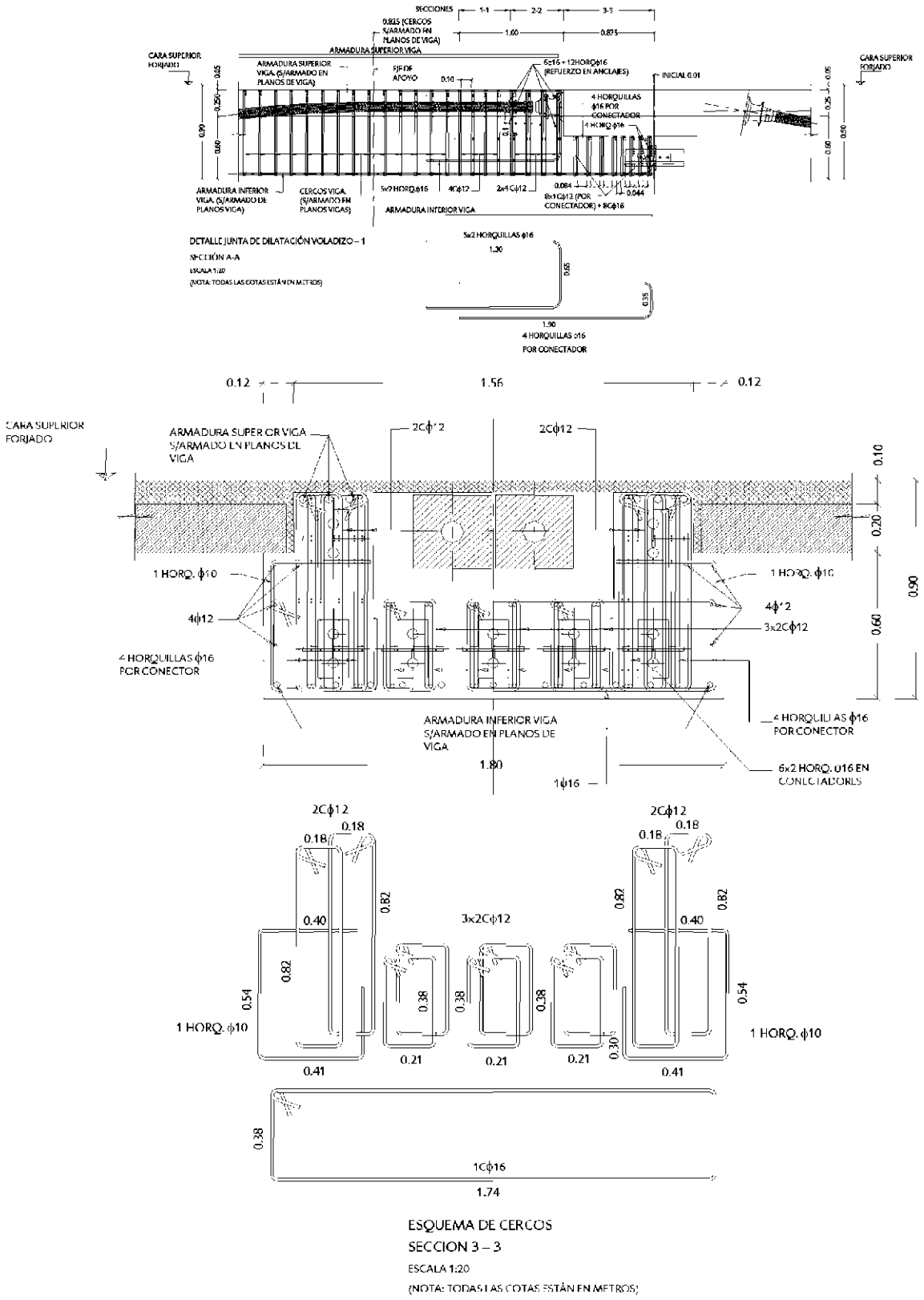


Figura 7.1. Detalle de la zona de la junta, definición geométrica, armadura pasiva, activa y conectadores.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 7.2. Fotografía de la ferralla de armadura pasiva de una de las partes de la junta de dilatación.

Figura 7.3. Fotografía de una de las partes de la junta ejecutada esperando la ejecución de la viga adyacente.

2.3. Ensayos de los sistemas de transmisión de cortante utilizados en las juntas de dilatación

Como se ha dicho, las juntas de dilatación exigían la utilización de elementos de transmisión de cortante de 1.400 kN de capacidad y 0,070 m de desplazamiento máximo.

La obra disponía de dos ofertas procedentes de otros tantos sistemas y se exigió, a cada uno de ellos, la realización de ensayos en el Laboratorio de Estructuras de la ETS de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM, para comprobar la idoneidad del sistema propuesto.

Para cada uno de los suministradores, STAIFIX [2] y CRET [3], se realizaron unos ensayos de capacidad resistente, compatibles con la abertura máxima prevista para la junta.

Los fabricantes, a través de sus respectivas oficinas técnicas, propusieron una disposición de armadura pasiva en la zona de los conectadores. Esta armadura era muy superior a la propuesta por el proyecto, deducida a partir de un modelo de bielas y tirantes.

Debido a la imposibilidad de realizar el ensayo de toda la junta se ensayaron dos elementos, con dos conectadores cada uno, que representaban la situación de la zona lateral, donde hay dos conectadores, uno encima del otro, y de la zona central, donde hay cinco conectadores en fila. En la Figura 8 se muestran las dimensiones de las probetas utilizadas y su relación con la junta real.

En la Figura 9 se muestra la disposición de ensayo adoptada y la instrumentación dispuesta.

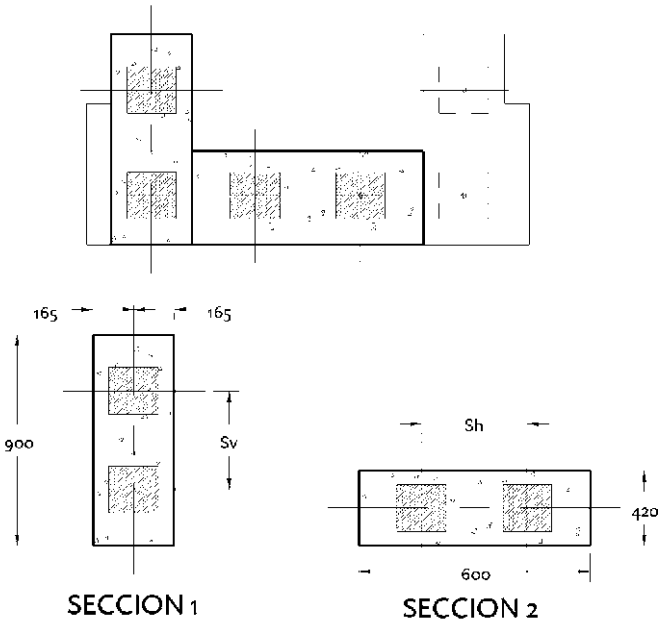


Figura 8. Definición de la probeta para el ensayo de los conectadores de cortante.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

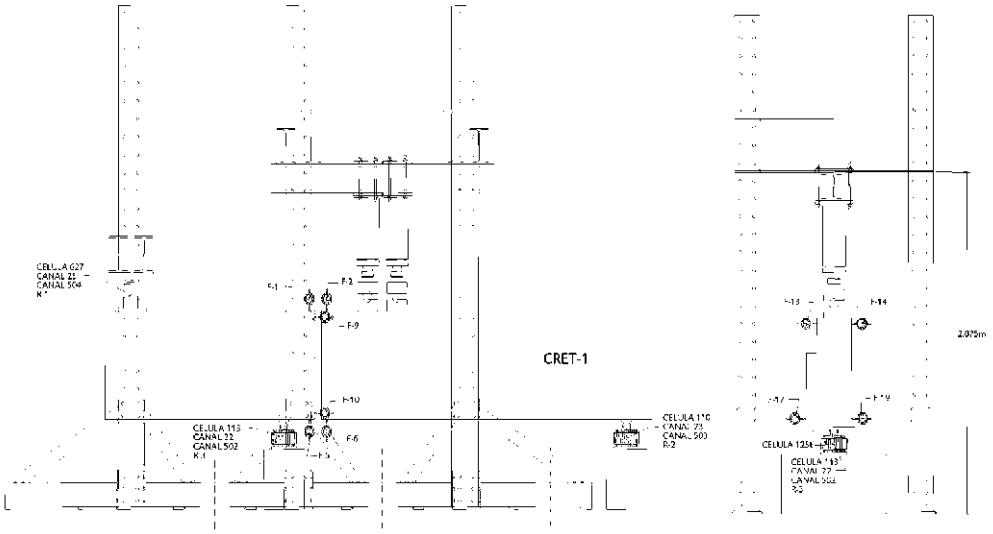


Figura 9. Disposición de ensayo e instrumentación adoptada.

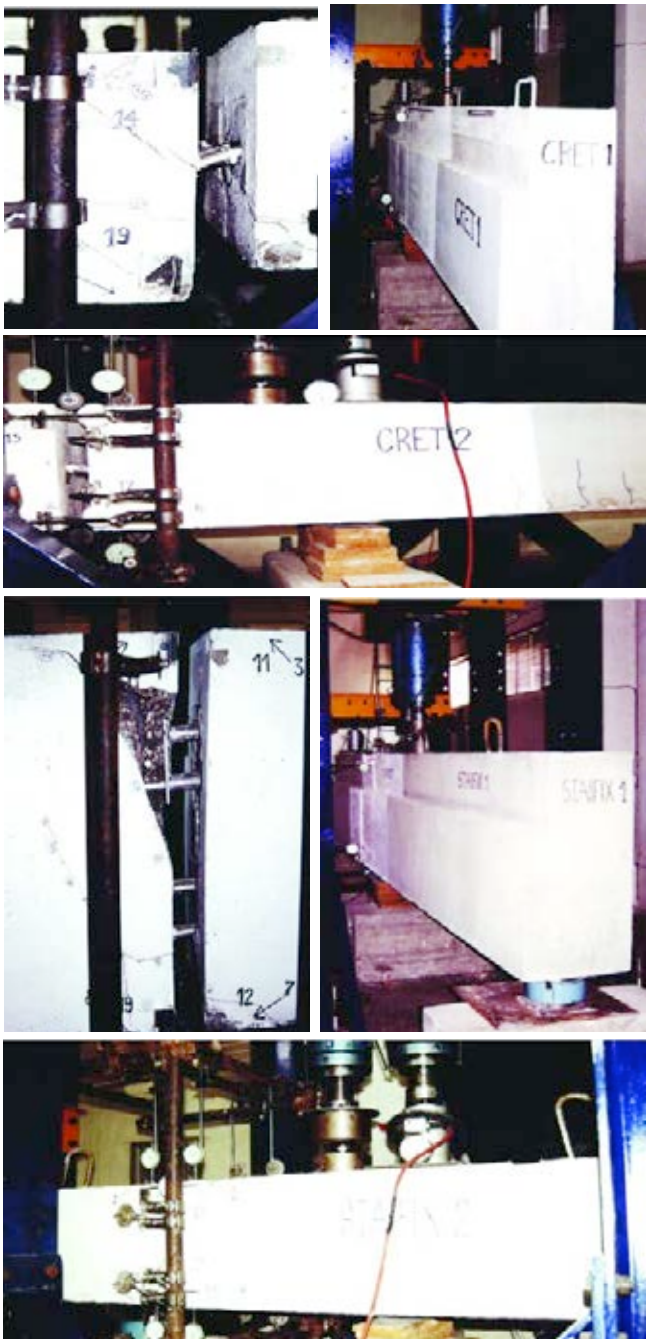


Figura 10. Fotos de los ensayos realizados.

Por último en la Figura 10 se muestran algunas fotos del ensayo.

De los resultados de los ensayos se pudo concluir que ambos sistemas cumplían con las condiciones exigidas. Se comprobó, asimismo, que utilizar armadura superabundante, como la propuesta por las oficinas técnicas de los suministradores, normalmente no sólo no supone un aumento de las condiciones de seguridad de la estructura sino que se anticipaba la rotura. La gran cantidad de armadura propuesta por los fabricantes suponía la utilización de barras de gran diámetro con radios de doblado grandes y, consecuentemente, la existencia de recubrimientos muy grandes que dejaban grandes zonas de hormigón sin armadura que anticipaban la rotura.

Una vez elegido el suministrador de los conectadores de cortante, por razones comerciales y económicas, se procedió a realizar otro ensayo con la disposición de armado propuesta por el proyectista y con un sistema de ensayo que permitiera reproducir, no sólo la capacidad portante máxima para la máxima abertura de junta prevista, sino la cinemática del sistema [4].

Para ello se realizaron otros ensayos que permitían cargar la probeta hasta la carga cuasi-permanente y luego abrir y cerrar la junta desde el valor inicial al máximo previsto. Después de una serie movimientos se procedía, con la máxima abertura de junta prevista, a romper la probeta. En la Figura 11 se muestra la disposición de ensayo adoptada y la instrumentación dispuesta.

Por último, en la Figura 12 se muestran algunas fotos del ensayo.

Los resultados obtenidos han mostrado la idoneidad del sistema ensayado y de la disposición de armadura pasiva adoptada.

3. EDIFICIO SATÉLITE

El Edificio Satélite del NAT Barajas ocupa en planta una superficie aproximada de 70.000 m^2 y una superficie total de 287.384 m^2. De forma similar al Edificio Terminal, consta de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Realizaciones

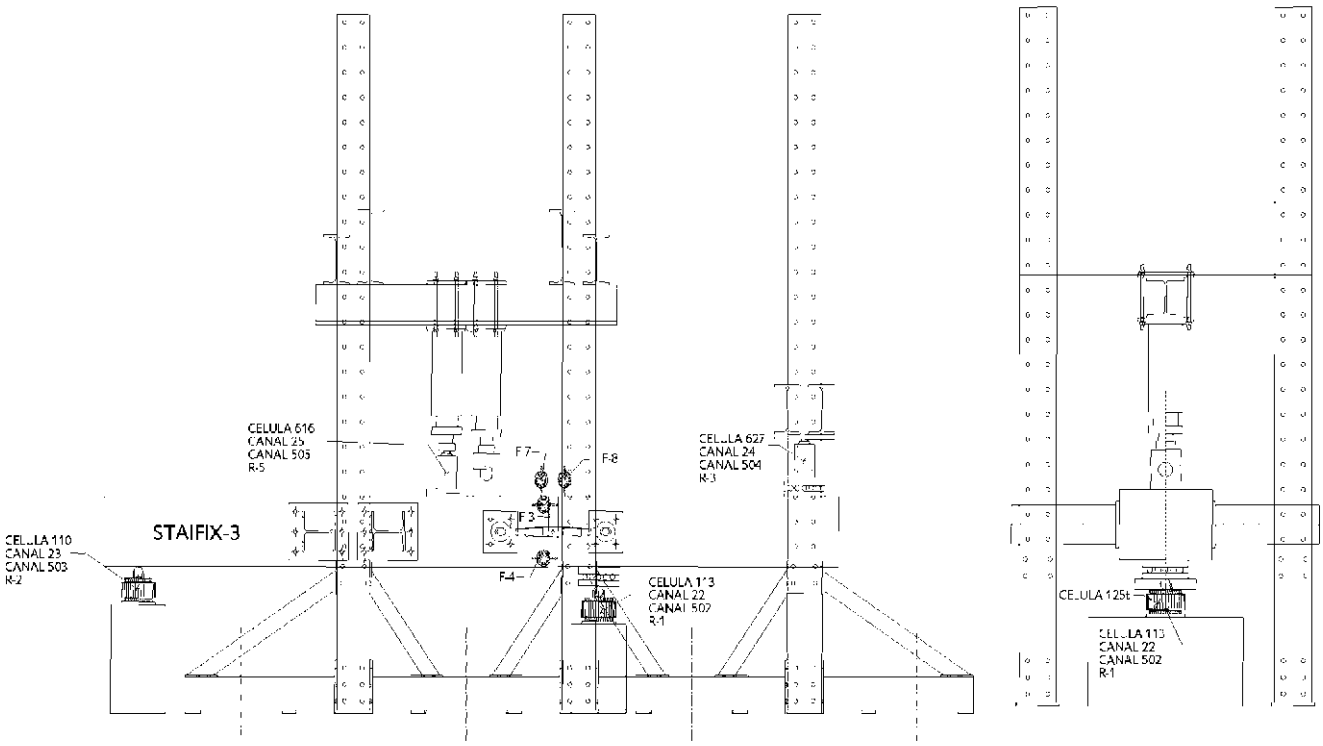


Figura 11. Disposición de ensayo e instrumentación adoptada.

Figura 12 Fotos de los ensayos realizados.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 13. Vista general del Edificio Satélite.

una zona central de 144x180 m y dos diques de 396x54 m cada uno [14].

También tiene 5 niveles sobre cimentación, los niveles –2, -1, 0, +1 y +2, con cotas relativas a rasante similares a las del Edificio Terminal.

3.1. Estudio de alternativas y descripción de la solución estructural propuesta

El estudio de soluciones en este caso no fue necesario para la zona general, porque se adoptaron los mismos criterios que para el Edificio Terminal. En cualquier caso, la zona central presentaba unos problemas especiales al igual que una zona de uno de los diques, que se construyó sobre el Túnel de la M-111.

No obstante, los autores de este artículo han querido mantener un apartado específico relativo al diseño conceptual o estudio de alternativas, para dejar testimonio de su convencimiento sobre la necesidad realizar un trabajo profundo y serio de este tipo, en cualquier clase de estructuras y, por supuesto, también en los proyectos de arquitectura. Es un deber para los proyectistas realizar estas aproximaciones ya que son una garantía para evitar problemas mayores en etapas posteriores y un instrumento para generar nuevas ideas, aun a costa de que otros agentes del proceso no valoren su verdadera trascendencia. El tamaño, o la trascendencia estructural o económica no otorgan *per se* el carácter de gran proyecto. De cada proyecto hay que hacer un gran proyecto, por pequeño que sea su tamaño o cuantía económica. En todos los proyectos buenos hay una etapa seria e imprescindible de estudio de alternativas o de diseño conceptual.

3.2. Aspectos especiales del proyecto de construcción

En el Edificio Satélite, además de la estructura de los pórticos, para la que se ha utilizado la misma solución explicada en el apartado 2, se presentan otras zonas que tienen soluciones singulares y que merece la pena describir brevemente.

La primera singularidad se encuentra en la zona central. En este caso, la excavación es muy profunda y se ha planteado un

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

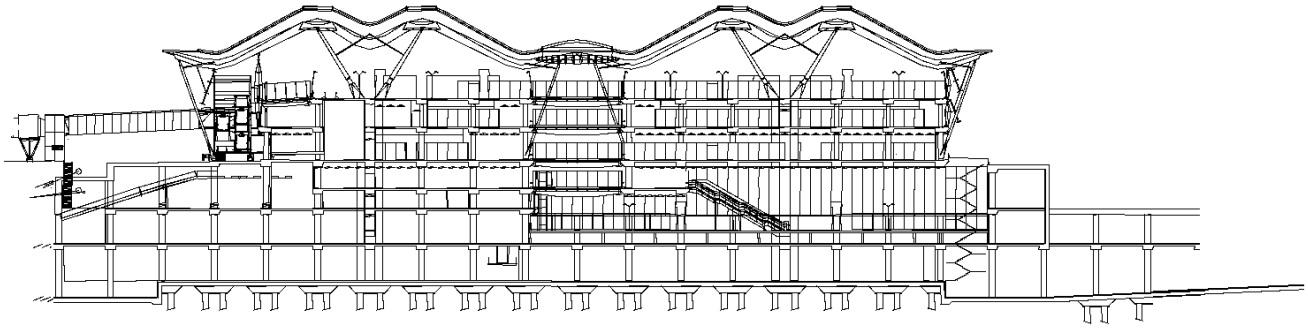


Figura 14. Sección transversal de la zona central.

recinto continuo de pantallas entre el nivel –2, a la cota –14,645, y el nivel –3, situado a la cota –21,10. Desde el nivel superior de la pantalla se alcanza la cota de los niveles superiores, -1 y 0, con un muro *in situ*.

Para las pantallas se han planteado unos anclajes temporales, durante la excavación, y para garantizar un arriostramiento adecuado en situación definitiva, se han proyectado dos losas de canto constante de 0,30 m, apoyadas sobre una cuadrícula de pilares de 9,00 x 9,00 m. Estas losas, de grandes dimensiones (144,00 x 180,00 m), no tienen juntas ya que es la única forma de garantizar el arriostramiento deseado.

A partir del nivel -1 se vuelve a la solución de pórticos, tal como ocurre en el resto de edificio.

Los criterios de proyecto seguidos para la definición de estas estructuras, desde el punto de vista de los efectos de las deformaciones impuestas, son similares a los utilizados para los pórticos generales, explicados en el apartado 2.

En la Figura 14 se muestra una sección transversal de la solución en la que se pueden ver los distintos aspectos comentados. En la Figura 15 se muestran distintas fotos de diferentes etapas de construcción de esta zona.

La otra zona singular la constituye la construcción de parte del Dique Sur sobre el Túnel de la M-111. Este túnel tiene una sección transversal con cuatro compartimentos. En los dos centrales circula la M-111, mientras que los compartimentos laterales están previstos para servicios.

El proyecto de la parte del túnel, que soporta el Dique, ha sido realizado por OHL, considerando los esfuerzos provenientes de la estructura del Satélite.

La estructura del Satélite de esta zona está resuelta con la tipología general de pórticos. En la Figura 16 se muestra una sección transversal de la zona y en la Figura 17 se ve el túnel y los muros donde arranca la estructura del dique.

Figura 15. Zona central. Distintas etapas durante la construcción.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

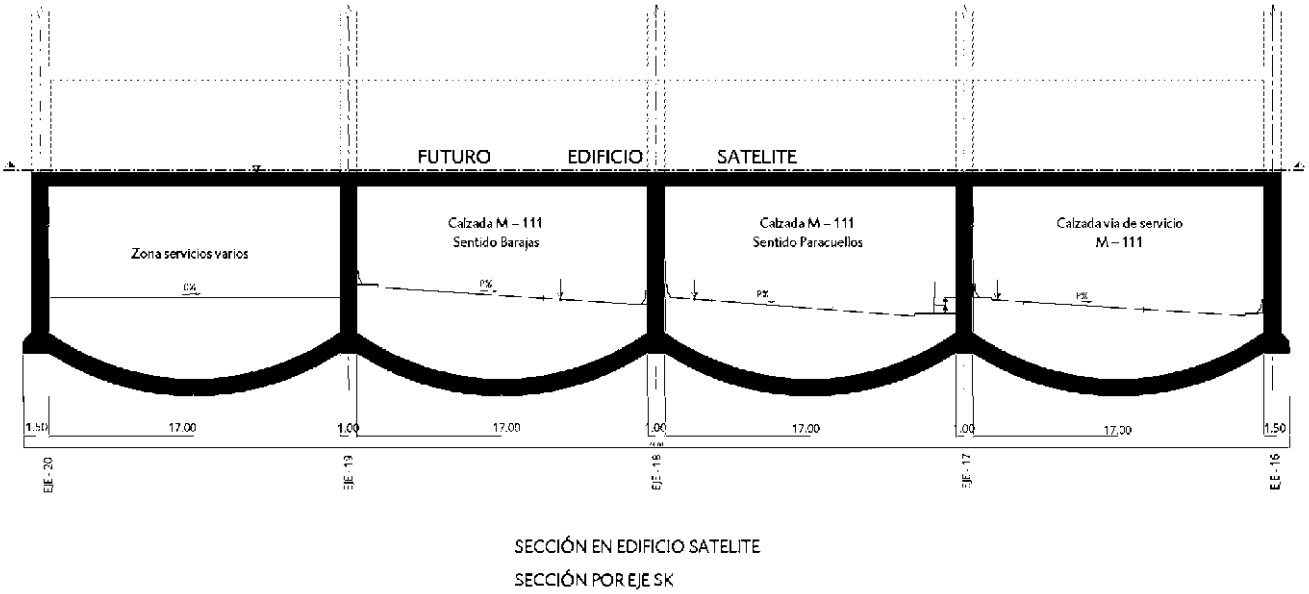


Figura 16. Sección transversal de la zona de Dique Sur sobre el Túnel de la M-111.

3.3. Experimentación de seguimiento del comportamiento de un pórtico de 72,00 m y evaluación de las cargas de temperatura y reológicas [5] [6] y [7]

Dadas las características especiales de los pórticos monolíticos con vigas pretensadas con armadura postesa con una longitud de 72,00 m, se planteó un programa de investigación financiado por el Ministerio de Fomento y que ha contado asimismo con la colaboración de las empresas constituyentes de la UTE constructora Dragados y Ohl. La investigación fue realizada por el Grupo de Hormigón Estructural, del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de las Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

El objeto de la investigación era doble: por un lado, medir experimentalmente las acciones a las que está sometido el pórtico instrumentado; por otro lado, se analiza su comportamiento desde un punto de vista teórico sobre la base de la evidencia experimental. Para ello se han medido las condiciones medioambientales, temperatura y humedad, en el hormigón de

Figura 17. Zona de Dique Sur sobre el Túnel de la M-111. Distintas etapas durante la construcción.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

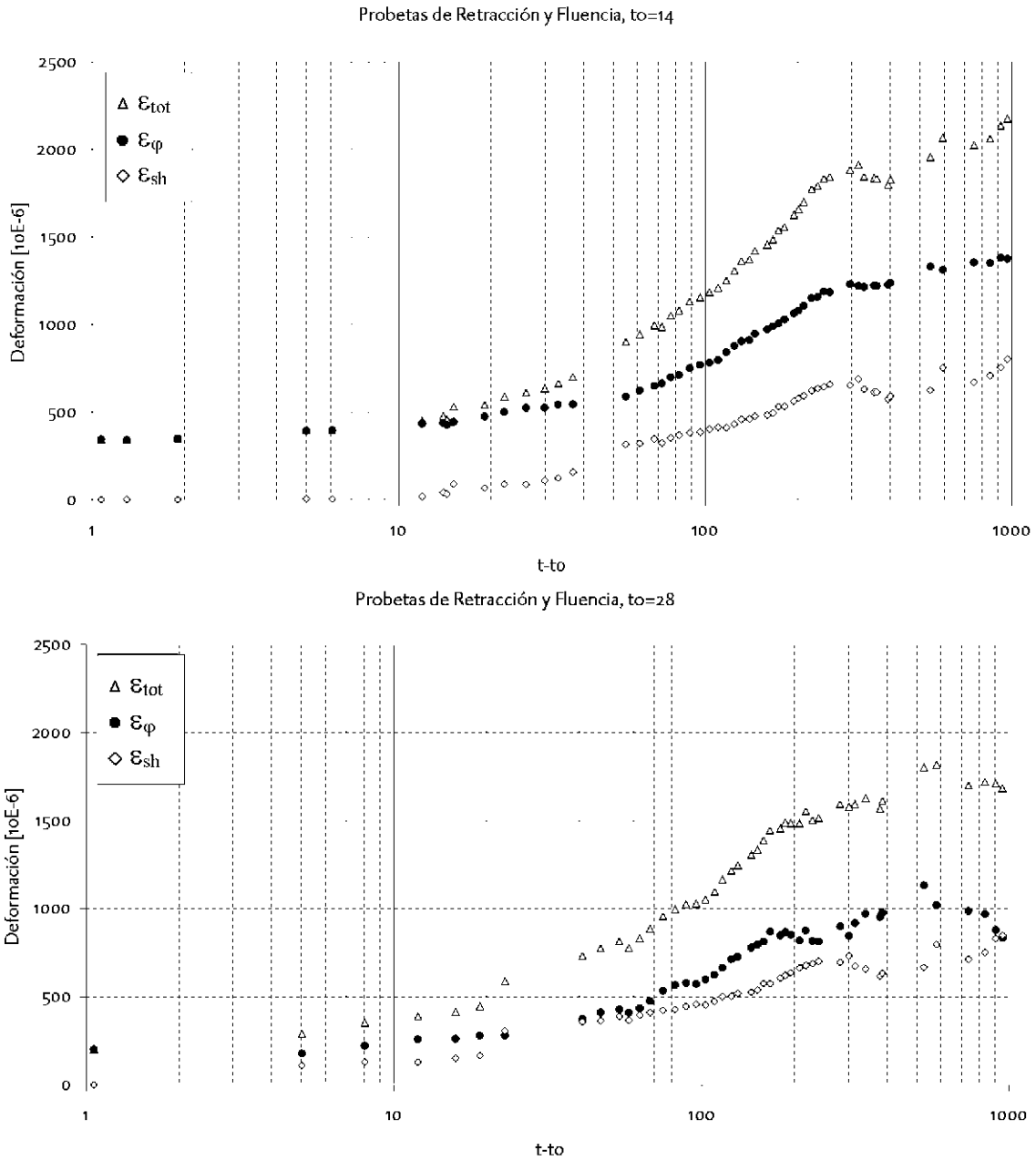


Figura 18. Resultados de fluencia para distintas edades de puesta en carga y retracción de los hormigones.

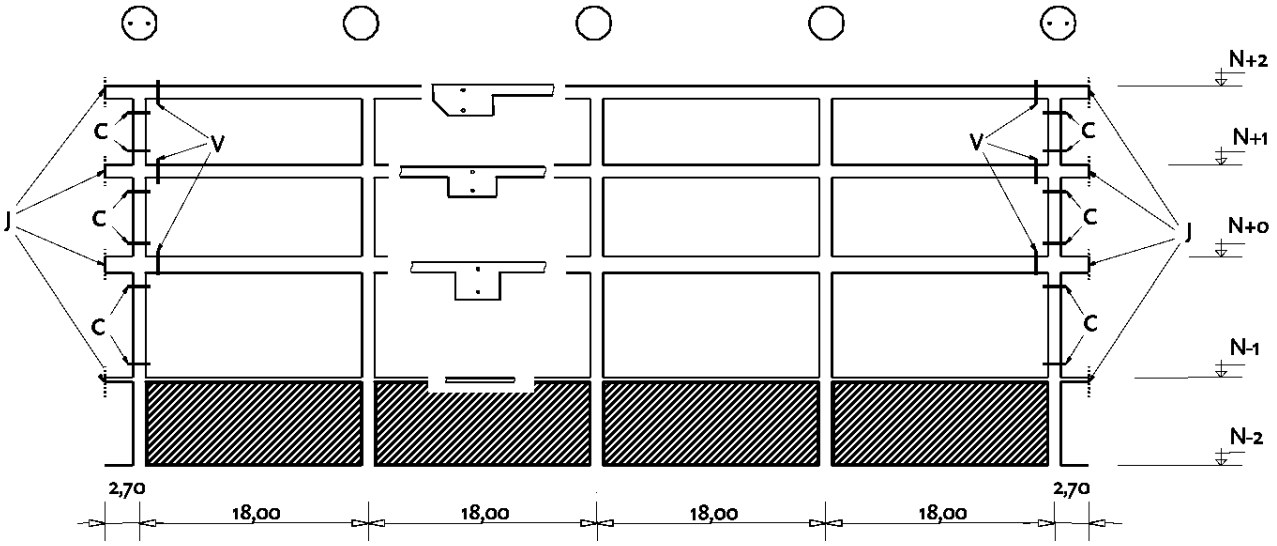
distintos elementos estructurales, y se han realizado mediciones locales, en distintas plantas de la obra, con estaciones meteorológicas de registro continuo. Estos datos se han cotejado con los globales aportados por la estación del Instituto Nacional de Meteorología más cercana a la obra.

Asimismo se han estudiado las propiedades reológicas del hormigón de las vigas y pilares, se han realizado ensayos de retracción y fluencia, para dos tiempos de puesta en carga: t_0=14 y t_0=28 días. En la Figura 18 se muestran los resultados obtenidos. A partir de estos resultados se ha ajustado un modelo teórico, tipo EHE, específico para los resultados experimentales obtenidos [8]. Por último se han caracterizado los hormigones utilizados, a lo largo del tiempo, desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas: resistencia a tracción, resistencia a compresión y módulo de deformación longitudinal.

Por otro lado, se ha estudiado un pórtico que se ha instrumentado, con distintos tipos de sensores, para analizar su comportamiento. Es muy importante tener en cuenta que los problemas que afectan a este tipo de estructuras pueden observarse en servicio, por lo que las estructuras existentes son una fuente interesantísima de información. En contrapartida, hay que poner de manifiesto la enorme dificultad que tiene la monitorización de estructuras, tanto durante la construcción como en servicio. En este trabajo se han sufrido robos de instrumentación y ataques de vandalismo que han dado lugar a interrupciones en la toma de algunas medidas.

En las Figuras 19 y 20 se muestran un esquema del pórtico instrumentado y fotos de la instrumentación utilizada, respectivamente. En las pilas se han medido deformaciones en distintas fibras de la cabeza superior e inferior, con barras instrumentadas y extensómetro mecánico. En las vigas se han medido deformaciones, en distintas secciones, en la fibra superior e inferior con barras instrumentadas y en la fibra media con extensómetro mecánico. También se ha medido la temperatura del hormigón de las distintas secciones instrumentadas. Por

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025



V	Sección de medición en viga longitudinal
C	Sección de medición en pilar extremo
J	Sección de medición en junta

Figura 19.1. Esquema general de la instrumentación del pórtico.

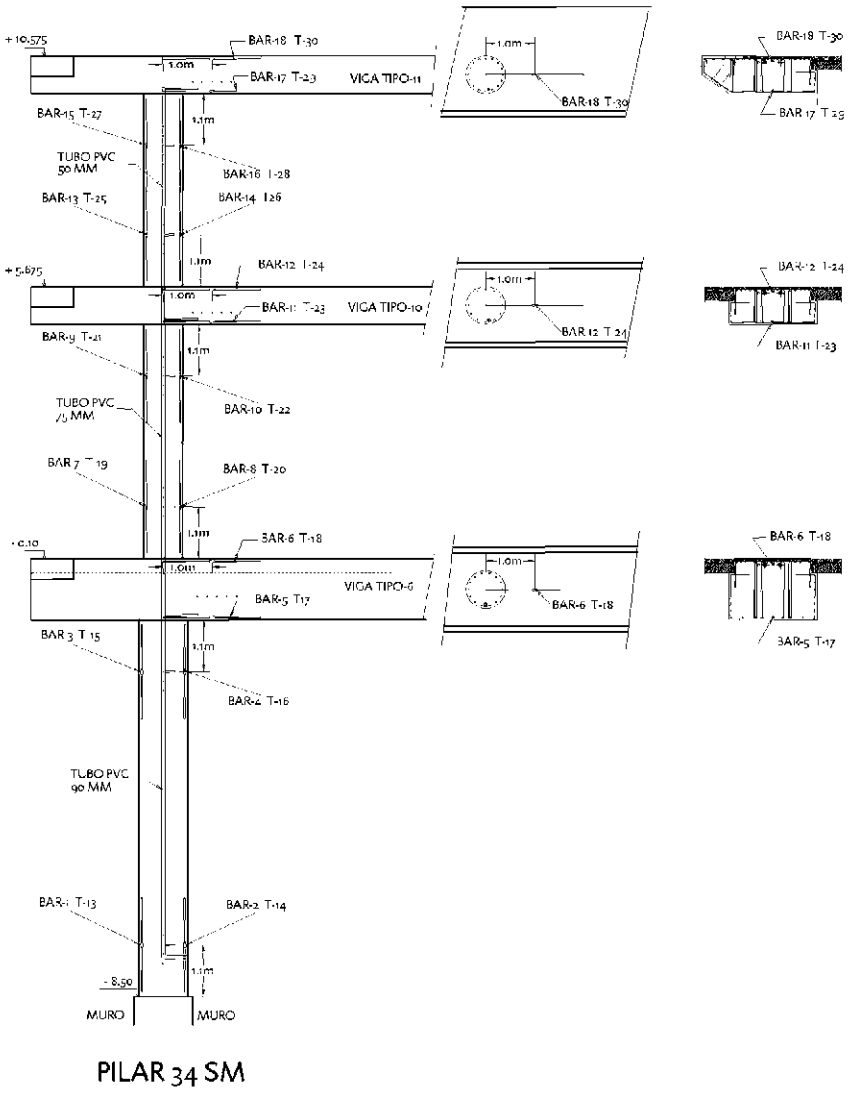


Figura 19.2. Detalle de la instrumentación del pilar en el extremo del pórtico donde se han utilizado barras instrumentadas.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

1) 2) 3)

4) 5) 6)

Figura 20. Instrumentación utilizada.

1) Barras instrumentadas en pilares.
2) Estación meteorológica.
3) Sistema de adquisición de datos para distintos sensores.
4) Termopares en vigas.
5) Sistema de medición de abertura de juntas.
6) Bases de medida con extensómetro mecánico.

último se han medido las aberturas de las juntas de las vigas de los distintos niveles.

En la Figura 21 se muestran algunos de los resultados obtenidos. El resultado de la Figura 21.1 corresponde a las mediciones realizadas en la sección inferior del nivel N-1 del eje SM 34. En la Figura 21.2 se muestran los resultados obtenidos en la sección de una viga. En cada figura se muestra una serie de registros: la temperatura medida en el interior del elemento y los valores de deformación de las fibras instrumentadas de la sección analizada. Los registros continuos son de las barras instrumentadas y los registros discontinuos los obtenidos, en distintos momentos, con un extensómetro mecánico en la superficie exterior. Se muestran también los registros de humedad y temperatura correspondientes a las estaciones locales, superpuestos con los de la estación meteorológica más próxima. Como puede verse, la diferencia es muy pequeña.

4. APARCAMIENTO

El Edificio del Aparcamiento consta de cinco plantas con una superficie total construida de 309.000 m^2. El edificio está dividido en 6 módulos de 112,00 x 80,00 m. El edificio está organizado sobre una malla de pilares de 8,00x 8,00 m [15].

4.1. Estudio de alternativas y descripción de la solución estructural propuesta

Inicialmente el proyecto estaba planteado con módulos más pequeños, aunque de dimensiones mayores que las normalmente utilizadas en edificación. Durante el estudio de alternativas se planteó aumentar al máximo estas dimensiones, para minimizar el número de juntas.

La solución finalmente adoptada ha sido dividir el edificio en seis módulos con juntas de dilatación en voladizos de 4,00 m.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

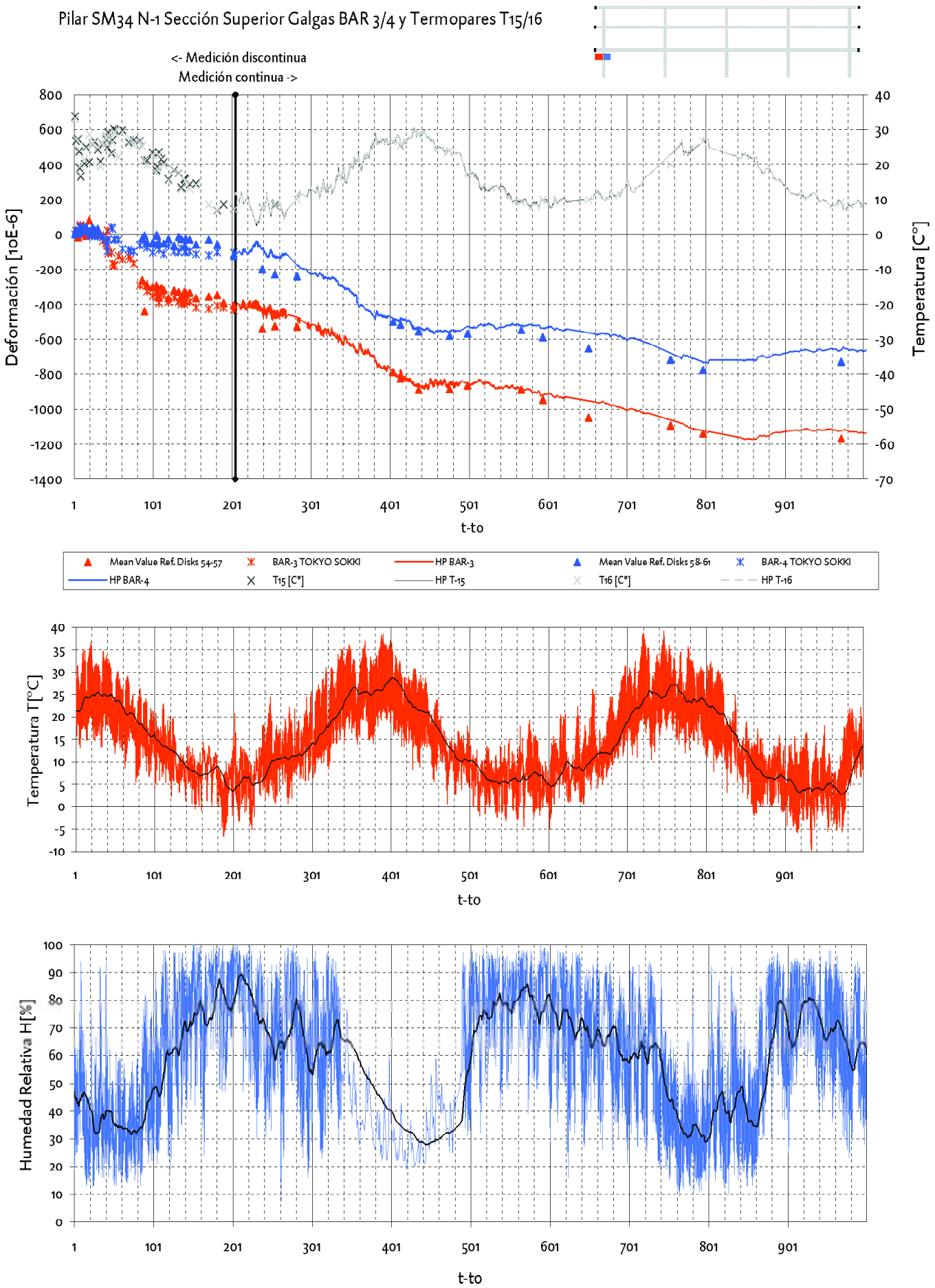


Figura 21.1. Resultados obtenidos en la sección superior de tramo N-1 del pilar SM 34.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Realizaciones

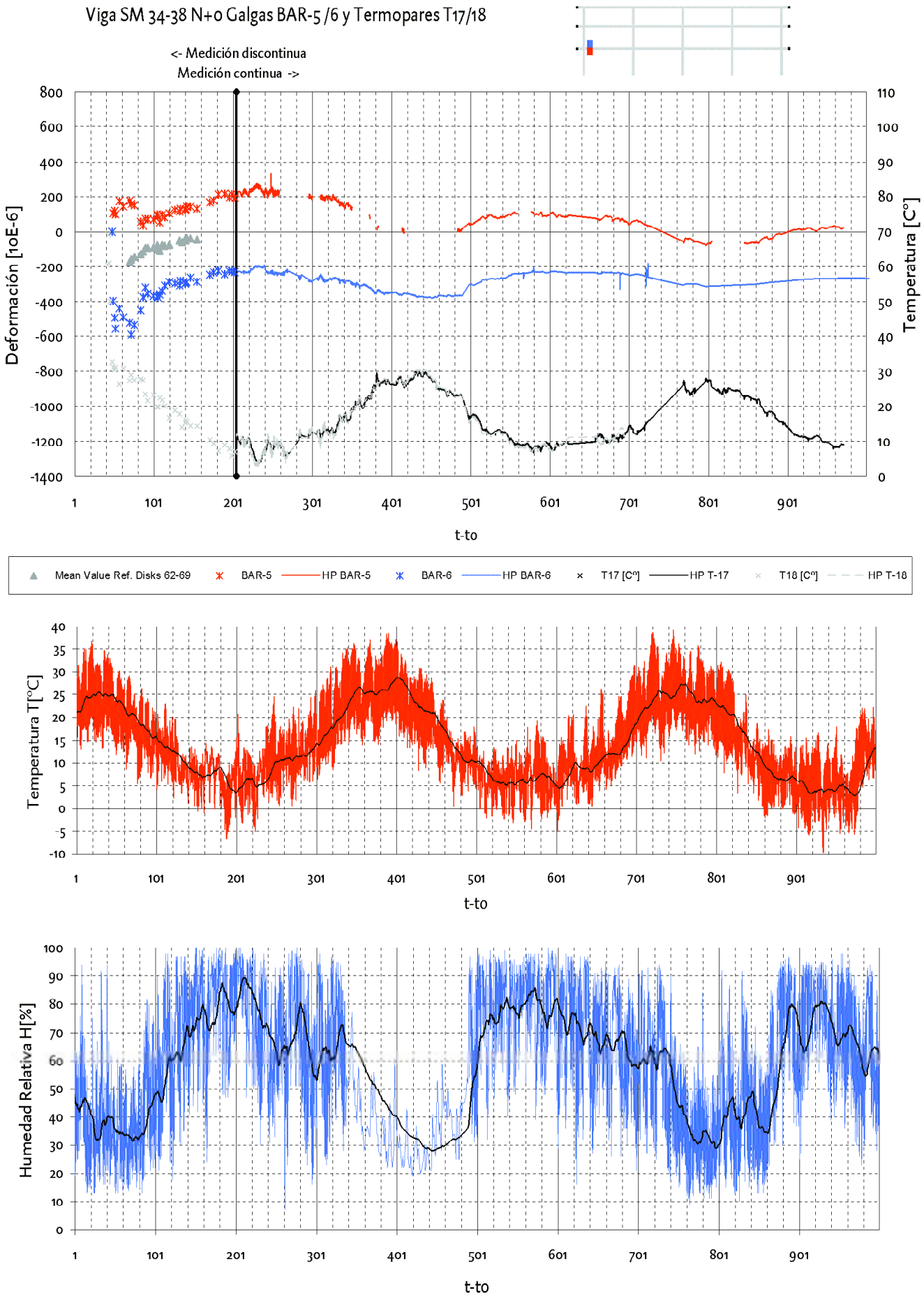


Figura 21.2. Resultados obtenidos en la viga $SM_{34\text{-}38}$ del nivel N+o en el eje T17-18.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 22. Vista general del aparcamiento.

Cada módulo estructural coincide con un módulo real de aparcamiento y las juntas están planteadas en coincidencia con los muros cortafuegos, situados cada 112,00 m.

Las plantas están resueltas con un forjado reticular de 30+8 cm de canto. Los forjados están apoyados en una cuadrícula de pilares de 8,00x 8,00 m. Los pilares son circulares y, en general, de 0,50 m de diámetro.

Para hacer más flexibles los pilares extremos de cada módulo y, por tanto, minimizar el efecto de las deformaciones impuestas sobre ellos, los pilares de las alineaciones más próximas a las juntas, en el primer tramo desde cimentación a planta baja, son más altos. En estos casos, la cimentación se ha bajado de cota respecto al resto de los pilares.

En la Figura 23 se muestra el detalle un forjado y los pilares. Por razones meramente arquitectónicas ha sido necesario dejar un berenjeno en los nervios, lo que ha obligado al uso de casetones especiales y a una pérdida de canto útil para mantener los recubrimientos exigidos. También por razones arquitectónicas ha sido necesario dejar un rebaje en los capiteles, en las zonas adyacentes a los pilares.

4.2. Aspectos especiales del proyecto de construcción

Para el análisis del efecto de las deformaciones impuestas se ha utilizado el mismo procedimiento que para el resto de las estructuras del Edificio Terminal y Satélite.

Tal como se ha comentado, **con objeto de evitar el desdoblamiento de pilares para la constitución de la junta, se planteó disponerlas en voladizo**, en el centro de una de las luces de 8.00 m, de tal forma que la estructura tuviera capacidad para trabajar con voladizos de 4.00 m en la zona de las juntas. Por otra parte, con objeto de evitar que se pudieran producir discontinuidades por deformación diferencial de un voladizo respecto de otro, tanto para las deformaciones diferidas como para las debidas a sobrecarga, se dispusieron pasadores tipo Goujon, de compatibilidad. En la Figura 24 se muestra un detalle de cómo se resolvió la zona de la junta de dilatación.

Otro aspecto interesante de este edificio es **la solución adoptada para la solera**. Este elemento se ha resuelto con unas dimensiones idénticas a la de los módulos del edificio. La solera tiene 0,20 m de espesor y está apoyada en un encachado de unos 0,20 m.

Para el proyecto se adoptaron dos hipótesis extremas.

Por un lado, que el rozamiento solera - encachado era grande y, consecuentemente, la solera estaba empotrada. En este caso los efectos de las deformaciones impuestas producen tracciones en la solera, no concomitantes con otros esfuerzos, y para ello se ha dispuesto una armadura mínima que equilibre la tracción en el hormigón antes de producirse la fisura. El valor de resistencia a tracción adoptado es el que corresponde a la resistencia media del hormigón a 28 días reducido por

Figura 23. Detalles forjado y pilares del Edificio de Aparcamiento.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

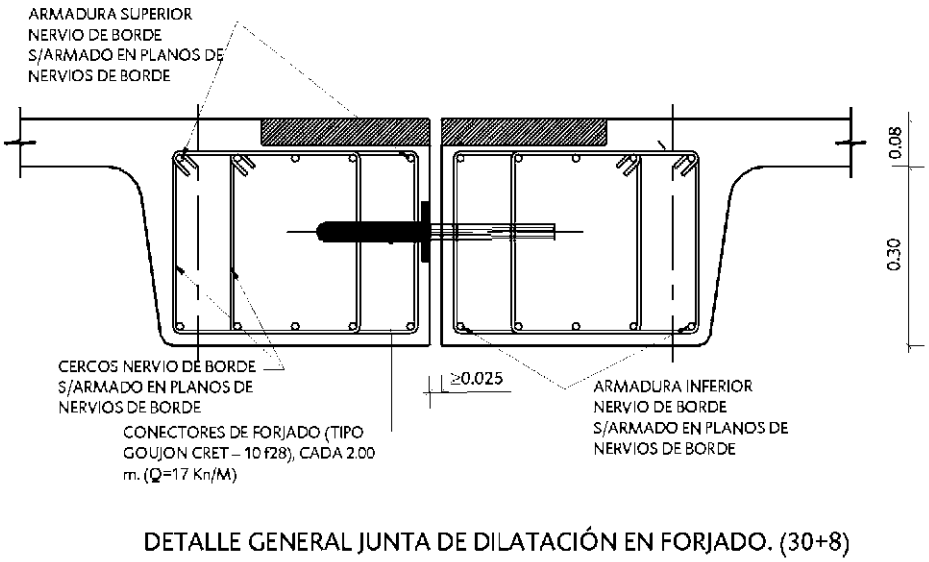


Figura 24. Detalle de la junta de dilatación del Edificio de Aparcamientos.

distintos factores que tienen en cuenta la variación de esta propiedad por tamaño, distribución de la retracción, efecto reductor de la fuerza total de tracción por fenómenos no considerados explícitamente, etc.[9][10].

Por otro lado se supuso que el rozamiento solera – encachado era nulo, en cuyo caso el efecto de las tracciones producidas en la solera es sólo el debido a la coacción interna de la armadura y tiene el mismo tratamiento de cuantías mínimas del caso anterior. Adicionalmente, para evitar crear contacto entre la solera, hipotéticamente con movimientos debidos a las deformaciones impuestas, y los pilares, se dejó una holgura entre ambos elementos. Aunque, en teoría esta holgura, de centímetros, es necesariamente mayor para los pilares más alejados del punto fijo y menor para los más próximos, por facilidad constructiva, se ha dejado la misma holgura en todos los casos.

Por último, como es frecuente en estos casos, se planteó la posibilidad de hormigonar la solera a tresbolillo para minimizar los efectos de la retracción. Esta idea, muy extendida, es completamente ineficiente y complica extraordinariamente la construcción. En la Figura 25 se muestra la evolución de la retracción, de acuerdo con el modelo propuesto por la EHE [11] y obtenida mediante el Prontuario Informático del Hormigón [12]. En la figura se puede ver que, para las condiciones de una losa de este tipo, con un espesor ficticio de 250 mm, la evolución de la retracción es muy lenta y, consecuentemente, durante el tiempo que se puede dejar discontinua una construcción integral, como esta solera, la retracción que se produce es mínima respecto al total que se producirá en años.

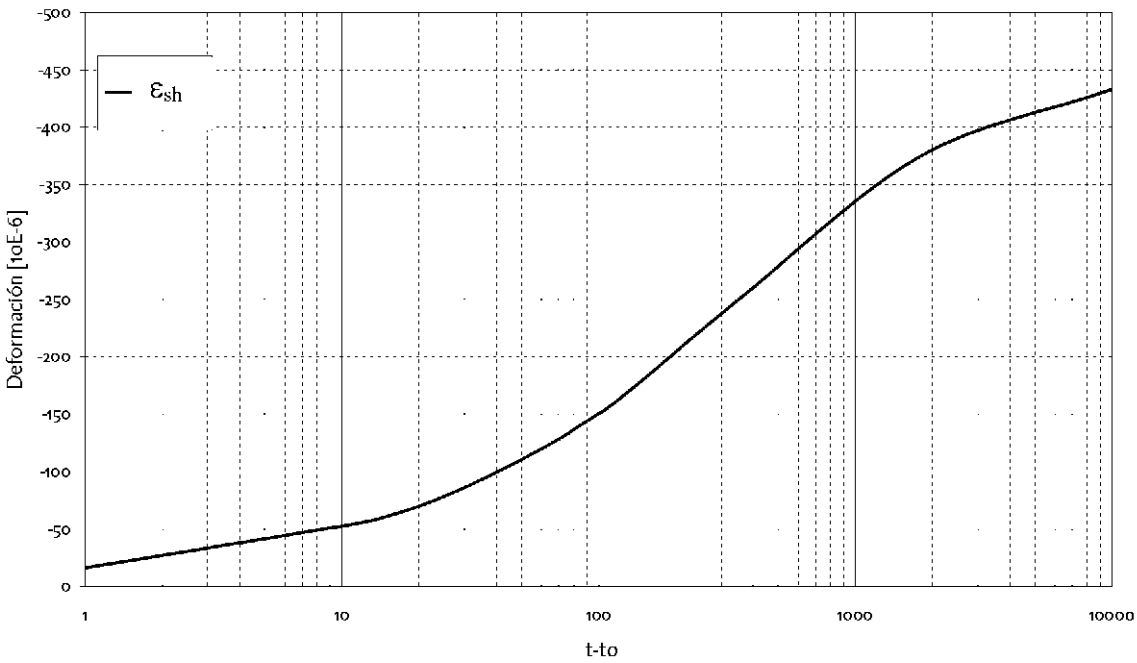


Figura 25. Evolución de la retracción, de acuerdo con el modelo de la EHE, para la solera del Edificio de Aparcamientos.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

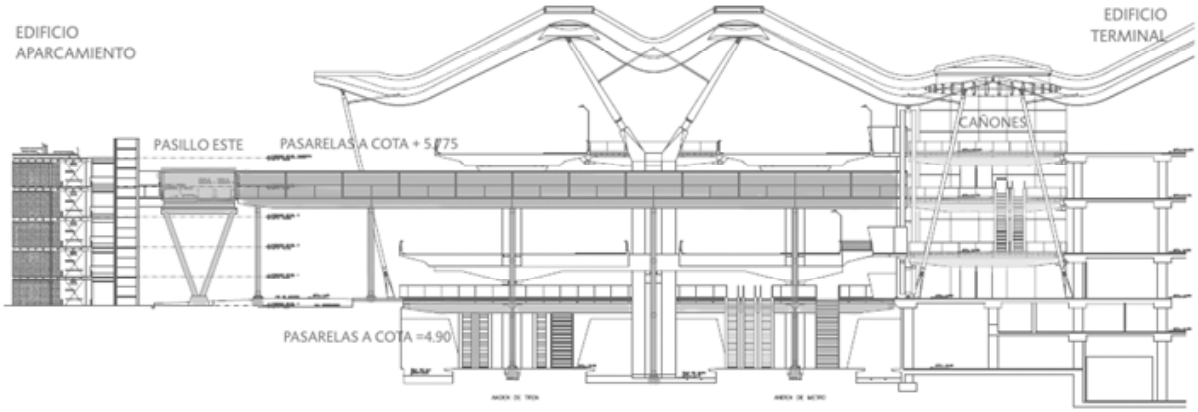


Figura 26. Sección transversal.

5. ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN ENTRE EL EDIFICIO DE APARCAMIENTOS Y EL EDIFICIO TERMINAL Y DENTRO DE LOS EDIFICIOS TERMINAL Y SATÉLITE

Para la comunicación entre el Edificio de Aparcamientos y el Edificio Terminal existen una serie de estructuras de conexión. Todas son metálicas y están resueltas utilizando perfiles y tubos de acero laminado. Como material de cerramiento o en la superficie de tráfico peatonal se ha utilizado chapa grecada o vidrio.

Estas estructuras, desde el punto de vista de proyecto, tienen el interés de unir edificios conceptualmente muy diferentes y de gran longitud. La compatibilidad de movimientos en las zonas de apoyo, sobre edificios diferentes, ha sido objeto de profundas reflexiones y estudio.

Ascensores panorámicos y montacargas. Estos ascensores permiten la circulación vertical de las distintas plantas del Edificio de Aparcamientos hasta el nivel superior, donde se sitúa el Pasillo Este que recoge todo el tráfico peatonal desde los Aparcamientos al Edificio Terminal. Son estructuras constituidas por pórticos de perfiles metálicos, situadas entre el edificio de hormigón de los aparcamientos y el pasillo Este metálico, ambas de gran longitud.

La estructura propuesta es independiente de las dos construcciones adyacentes y, a la vez, permite su conexión funcional.

Pasillo Este. Esta estructura es una pasarela metálica cubierta. En el nivel peatonal dispone de pasillos rodantes que complican extraordinariamente la estructura. Transcurre a lo largo de los módulos de los Edificios de Aparcamientos. Es una estructura independiente de los ascensores panorámicos. Tiene una longitud de casi 600,00 m, 8,20 m de ancho y luces de 18,00 m.

El tablero de esta estructura está formado por 2 perfiles longitudinales HEB-900 con perfiles transversales HEM-320 cada 6,00 m. El tablero está apoyado sobre unas pilas en forma de V que tienen gran rigidez transversal, para las cargas horizontales, y menor rigidez longitudinal, para permitir movimientos longitudinales y acotar su magnitud.

Pasarelas transversales a la cota +5.775. Al mismo nivel que el Pasillo Este, existen dos pasarelas que conectan esta estructura con el edificio Terminal. Estas pasarelas, de luces 12,00 - 3×15,00 - 12.00 m, tienen una tipología estructural similar a la del Pasillo Este.

Pasarelas a la cota –4.90. Por debajo de las dársenas, puentes de acceso al Edificio Terminal para Taxis, Autobuses y transporte privado, existen una serie de pasarelas transversales de distintos anchos que tienen una tipología estructural parecida al resto de las pasarelas descritas anteriormente, aunque no son cubiertas.

Figura 27. Ascensores y montacargas panorámicos de circulación vertical.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 28. Pasillo Este de circulación horizontal a través de los distintos módulos del Edificio de Aparcamientos.

Figura 29. Pasarelas peatonales a la cota +5,775.

Figura 30.Pasarelas peatonales a la cota -4,90.

Cañones. Dentro de los Edificios Terminal y Satélite, existen una serie de pasarelas peatonales que conectan distintas partes del edificio. Son elementos muy ligeros, normalmente de un solo vano, muy esbeltos y estructuralmente están resueltos con vigas metálicas y vidrio en la superficie del tablero.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 31.Cañones.

6. ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN Y ACCESOS

Para acceder a la nueva Terminal se ha proyectado un red viaria que incluye un gran número de estructuras, entre las que se cuentan 10 pasos superiores, un paso inferior, dos viaductos de acceso a las dársenas además de las propias dársenas situadas entre el Aparcamiento y el Edificio Terminal, que se desarrollan en dos pisos, dársena inferior y dársena superior. La planta y sección de las Figuras 32 y 33 dan una idea de la magnitud y cantidad de estructuras proyectadas y construidas.

Las dársenas son las estructuras más singulares de todo este conjunto. La dársena inferior está formada por dos tableros independientes que están apoyados cada 18,00 m en pilares. Para resolver la situación excéntrica de los tableros, respecto de las pilas, se han planteado unos dinteles transversales pretensados que recogen los tableros. Estos dinteles tienen canto variable entre 3,00 m y 2,20 m.

El tablero Este de la dársena inferior tiene un ancho de 24,29 m, salvo en el último vano que tiene un ancho de 7,20 m y que se sitúa excéntrico respecto del centro del tablero de los vanos siguientes. Por su parte, el tablero Oeste tiene 20,55 m de anchura, salvo en los vanos extremos en que el ancho se reduce a 6,20 m, situados también excéntricamente.

Los estribos de estas estructuras son elementos muy singulares debido a que su geometría viene condicionada, por una parte, por el paso de dos túneles de Metro, otros dos ferroviarios y otras consideraciones arquitectónicas y, por otra parte, por las cargas que se transmiten de la dársena superior.

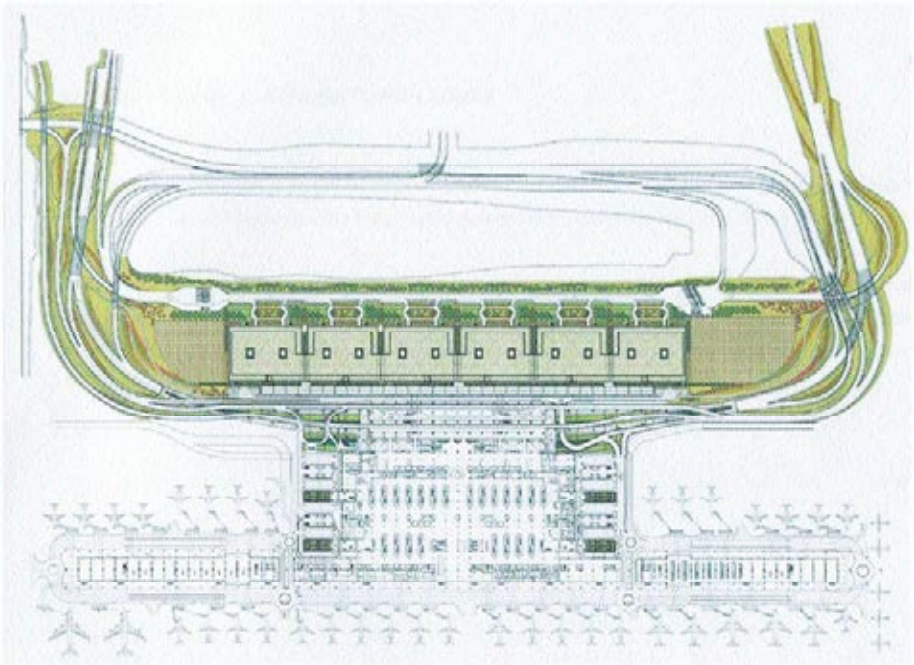


Figura 32.Planta general de viales de accesos y estructuras proyectadas.

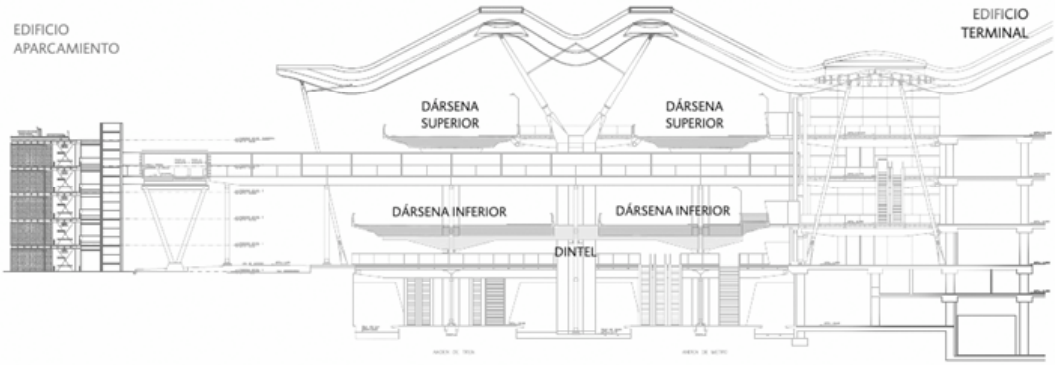


Figura 33. Sección transversal dársenas.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 34. Interior dársenas. Maqueta y estructura construida.

Figura 35. Dársenas en construcción.

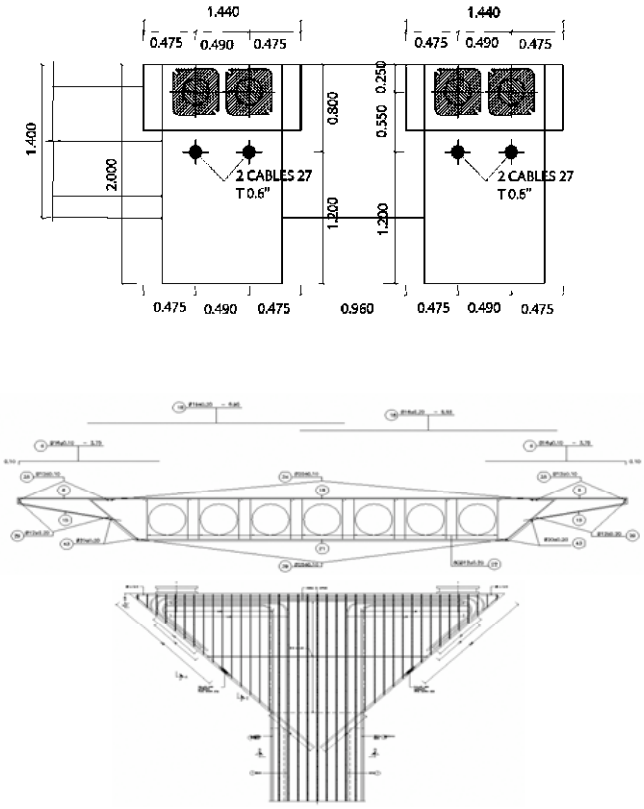


Figura 36. Sección dintel y sección dársena superior.

La dársena superior, compuesta también por dos tableros, tiene un vano más que la dársena inferior y termina con un voladizo de 9,50 metros. En este punto se produce una junta de dilatación en voladizo con los tableros de los viaductos de acceso. Esta estructura es una estructura armada de 1,40 metros de canto y con vanos de 18,00 metros de luz y de 16,50 m de ancho. Los dos últimos vanos, así como el voladizo final son más estrechos, de 10,20 m, y también son excéntricos respecto del tablero de los vanos centrales.

La misma idea utilizada para la junta de dilatación de los módulos del Edifico de Aparcamientos se utilizó para la junta entre la dársena superior y los viaductos de acceso a la dársena. También en este caso se produce la unión en el centro de un vano formado por dos voladizos, uno que corresponde a la dársena superior y el otro corresponde al viaducto de acceso. En este caso, debido a que los desplazamientos longitudinales son muy importantes y a que la compatibilidad requiere el desarrollo de una fuerza mucho mayor, no fue posible resolver este problema con la misma tecnología que en el aparcamiento, sino que fue necesario diseñar una estructura específica, tal como se muestra en la Figura 38. En este caso se dispusieron dos perfiles metálicos IPE-550, según el detalle que se muestra en la figura.

7. CONSIDERACIONES FINALES

Las estructuras de la NUEVA ÁREA TERMINAL DEL AEROPUERTO DE MADRID – BARAJAS son muy singulares y su solución ha

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 37. Estribo sur.

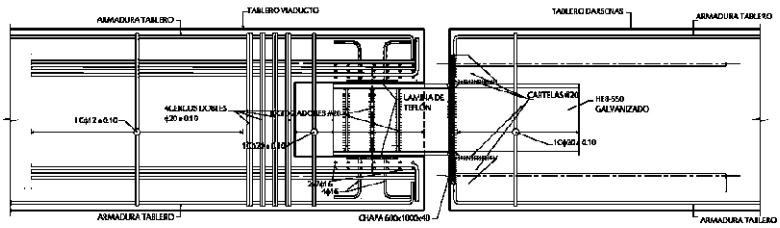


Figura 38. Junta de dilatación, en voladizo en el centro de vano, entre la dársena superior y los viaductos de acceso.

estado fuertemente condicionada por la dimensión de la obra y por la velocidad de ejecución requerida.

Se han utilizado ideas propias de la obra civil para resolver problemas de edificación. La transferencia tecnológica en esta dirección es muy interesante porque la escala de la edificación es mucho más reducida y, por lo tanto, las soluciones son más sencillas y económicamente más modestas.

Recíprocamente, se han utilizado en obra civil ideas propias de edificación. Siempre es posible adaptar a la obra civil conceptos provenientes de la edificación. Este es un paso más difícil pero igualmente rico e interesante.

Se trata de una obra en la que se han utilizado distintos materiales estructurales, cada uno en las circunstancias más propicias de acuerdo con sus propiedades. Hay estructura de hormigón débilmente armado, armado y pretensado, hay obra prefabricada e *in situ*, hay estructura metálica y mixta, hay estructuras de vidrio y textiles. Esta flexibilidad enriquece las soluciones estructurales y muestra la unificación de los conceptos estructurales. Es una tendencia iniciada hace tan sólo dos décadas por los grandes ingenieros estructurales, pero parece que más recientemente va ganando más adeptos.

Esta obra que ha permitido, a quienes hemos participado, revivir, una vez más, el milagro y la esencia de la ingeniería. Partir de una idea, transitar un camino, no sin dificultades, y ver estas ideas hechas realidad. Una vez más, vale la pena.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Corres, H.; Romo, J.; Torrico, J. Centro Comercial Avenida de Las Provincias. Fuenlabrada. Losas Postesadas Adherentes con Vaina Oval. II Congreso ACHE de Puentes y Estructuras de Edificación. Noviembre, 2002.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

[2] Corres, H.; Petschke, T.; Martín Caro, J.; Torrico, J.: Informe del Ensayo hasta Rotura del Conectador tipo Staifix DSD-150.

[3] Corres, H.; Petschke, T.: Martín Caro, J.; Torrico, J.: Informe del Ensayo hasta Rotura del Conectador tipo CRET-140.

[4] Corres, H.; Petschke, T.; Martín Caro, J.; Torrico, J.: Informe del Ensayo para Cargas de Servicio y Simulación de Movimiento, del Conectador tipo STAIFIX DSD-150.

[5] Corres, H.; Petschke T.; Ezeberry, J. Estudio Analítico y Experimental de los Efectos de las Deformaciones Impuestas en las Estructuras Integrales. Julio 2002. Ayuda para la Realización de Proyectos de Investigación Científica y Desarrollo e Innovación Tecnológica en el Marco de las Acciones Estratégicas del Área Sectorial de Construcción Civil y Conservación del Patrimonio Histórico Cultural del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003.

[6] Corres, H.; Martín-Caro J.A.; Petschke T.; Moreno V.; Torrico, J. Estudio Analítico y Experimental de los Efectos de las Deformación Impuestas en las Estructuras Integrales. Hormigón y Acero. Año 2004

[7] Corres, H.; Petschke, T.; Ezeberry, J..Auscultación de Estructuras Reales. III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Las Estructuras del Siglo XXI. Zaragoza. Noviembre, 2005.

[8] Pérez, A.: Comportamiento en Servicio del Hormigón Estructural. Estudio Teórico y Experimental. Tesis Doctoral Presentada en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

[9] Corres H.; Torrico, J. Estructura de la Oficina de Armonización del Mercado Interior (OAMI). Alicante. II Congreso ACHE Puentes y Estructuras de Edificación. Noviembre, 2002.

[10] Cámara, J. Comportamiento en Servicio de Estructuras de Betão Armado e Preesforçado. Universidad Técnica de Lisboa. 1988.

[11] EHE Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento. Septiembre, 2002.

[12] Corres, H.; Martínez, J.L.; Pérez, A.; López, J.C. Estructural. Unidad Docente de Hormigón Estructural E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Madrid. IECA.

[13] Gómez Hermoso, Jesús: “Relación entre el proyecto, la ingeniería de detalle de construcción y la ejecución del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[14] Fernel Fernández, José Pedro: “Edificio Satélite de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[15] Fernel Fernández, José Pedro: “Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal

Parking and access to the new Terminal Area

José Pedro Fernel Fernández
Ingeniero Aeronáutico
Dirección Técnica
Dragados, S.A.

RESUMEN

Este artículo describe diversos aspectos del Edificio de Aparcamiento y de otras estructuras de acceso o conexión entre edificios, integradas todas ellas en la Nueva Área Terminal del aeropuerto de Madrid-Barajas. El Aparcamiento con sus características especiales constituye una obra singular dentro del Nuevo Área Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas, con una capacidad para 9.000 vehículos y un importante núcleo de ascensores y pasarelas de intercomunicación. Dotado de una cubierta ecológica de 52.000 m^2, totalmente innovadora y que constituye un importante avance en el camino hacia la sostenibilidad de los procesos de edificación. La obra ejecutada incluía asimismo parte del túnel de conexión entre los edificios Satélite y Terminal y los accesos correspondientes a las diversas áreas, que también se describen brevemente.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, aparcamiento, estructuras, fachada, NAT, terminal, túnel, ecológica, reciclado materiales, accesos.

1. SUMARY

This paper describes several aspects of the Parking building and other structures for access or connection between buildings, all of them integrated in the New Terminal Area of Madrid-Barajas airport. The Parking building, with its special characteristics, represents a singular work, with capacity for 9.000 vehicles and an important core of lifters and intercommunication passages. It has an innovative 52.000 m^2. ecologic roof, which represents an important step towards sustainability of the building processes. The work performed also included part of the connection tunnel between the Satellite and Terminal Buildings and the corresponding access to the different areas. These are also briefly described in the paper.

Kew words: *Airport, Barajas, parking, structures, façade, NAT, terminal, tunnel, ecologic, recycled materials, access.*

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El Aparcamiento, su conexión con la Nueva Terminal, los accesos, que incluyen los necesarios para diferenciar los distintos tráficos dirigidos a la Terminal, los túneles y andenes de las estaciones de Metro y RENFE constituyen el conjunto de servicios de infraestructura que posibilitarán el tránsito por tierra a todos los usuarios [1].

Por su parte, el Túnel de Servicios Aeroportuarios conforma la arteria principal de todo el funcionamiento del Nuevo Aeropuerto de Madrid-Barajas [2]. Las conexiones viarias con el Aparcamiento se extienden de Sur a Norte, con una longitud de 730 m y un ancho de 11 m, con controles de entrada y salida en los correspondientes extremos. Se ha realizado a la cota -5,60 m, aproximadamente, tomando como referencia el valor 0 para el Edificio Terminal. Su conexión con el edificio está formada por seis rampas dobles, con dos tramos rectos de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

42 m con pendientes del 7,7% y dos curvas, planas, con un radio interior de 6 m. y una anchura de 5,60 m.

El Edificio de Aparcamientos, situado al oeste de la Terminal y separada de ésta por las dársenas de acceso, tiene forma rectangular, 675 m de largo por 80 de ancho, está alineado en dirección Norte-Sur y tiene una superficie construida de 257.500 m^2, con una altura de 15,75 m. Está constituido por seis módulos iguales e independientes de 112x80 m, siendo su capacidad para 9.000 vehículos, con plazas tipo, normales, de 2,5 x 5,0 m y plazas especiales para discapacitados (6 por planta) de 3,75 x 5,0 m [2].

Dispone de un núcleo de ascensores, en cada piso, conectados mediante pasarelas. El mayor flujo de personas se produce en la última planta en la que además existen dos pasillos rodantes paralelos entre ellos. Desde aquí se realiza la conexión con el edificio Terminal mediante dos puentes, a través del conjunto de dársenas, situadas entre el Aparcamiento y la Terminal con una superficie en planta de 280 x 92 m.

En el nivel -2, cota -12,25 m, se encuentran los andenes de tren y metro. En el 0 se ubica la dársena de llegadas, con dos áreas diferentes no comunicadas entre sí; la primera para los autobuses, con 17 áreas de aparcamiento y dos islas de espera. La segunda está destinada a la recogida de los pasajeros por los taxis.

La dársena de salida, en el nivel 3, consta de dos estructuras con viales de tres carriles y aceras en el lado Este de cada una. La más cercana es para la llegada de los taxis y la otra para los vehículos privados. Todo el conjunto está bajo la prolongación de la cubierta del Edificio Terminal.

2. ESTRUCTURA DEL EDIFICIO APARCAMIENTO

La estructura es de hormigón armado, con modulación de 8x8 m, entre pilares de 50 cm de diámetro, estando cimentada sobre zapatas aisladas de 3x3x1,45 m. El forjado es reticular de 30+8 cm de espesor, realizado con casetones recuperables, formando una retícula de 80 cm. (Figura 1).

En [3] se describen con detalle las características esenciales de la estructura de este edificio.

3. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL APARCAMIENTO

El proceso seguido en su construcción puede resumirse en los párrafos que se incluyen seguidamente.

Se emplearon 6 grúas torre, tipo Pingón GP 45/20 de 48 m de pluma y con capacidad de carga de 2.500 Kg. en punta, colocadas a poste fijo en los dos huecos de patio de cada módulo. A medida que se terminó la estructura, cada grúa se desmontaba, colocándose en un nuevo módulo. Dos de ellas se dedicaban a los trabajos de cimentación y las cuatro restantes, a los ciclos del forjado.

Se utilizaron dos centrales para la fabricación del hormigón, situadas en los extremos del edificio, una CHZM-90 y una ORU 1.561, con capacidades de producción reales de 70 y 30 m^3/h, respectivamente. El transporte se efectuó mediante camiones hormigonera de 6 m^3 de capacidad.

Figura 1. Planta general de la estructura.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

La obra se acomete con un solo frente, en sentido longitudinal Sur-Norte, entrando los diferentes equipos de trabajo desfasados en medio módulo. La organización de las actividades fue la que se describe en los siguientes subapartados.

6.1. Movimiento de tierras (6 meses)

Se han excavado 1.200.000 m^3, con un rendimiento de 10.000 m^3/día, utilizándose 6 retroexcavadoras tipo Komatsu PC750 SE-6 y 60 camiones para el transporte de las tierras al vertedero, situado a 8 Km. de distancia (Figura 2).

Figura 2. Ejecución del movimiento de tierras.

6.2. Cimentación

Se dispusieron tres subequipos de trabajo, para su ejecución en ocho meses.

El primero, para la realización de las zapatas (1.016 uds.) avanzó a un ritmo de 8 uds/día, con el apoyo de una retroexcavadora y 2 camiones, 4 oficiales ferrallas y 3 encofradores. El hormigonado se efectuó con vertido directo, desde el camión hormigonera y se dejó colocada la ferralla de los pilares de arranque (Figura 3).

El segundo equipo, para la ejecución de estos pilares de arranque, trabajaba con el mismo ritmo que el anterior y la ayuda de 4 encofradores, empleando encofrados perdidos circulares de cartón, hormigonando con grúa y cubo de 0,5 m^3.

El tercero, para la ejecución del encachado y soleras, trabajaba con un avance diario equivalente a los anteriores, es decir, por crujías de 16x16 m. El equipo humano se compuso de 3 operarios para el encachado y 4 operarios para la solera. El material de encachado a colocar se vertía con grúa y cubos de 1,5 m^3, mientras para el hormigón de soleras se empleaba grúa y recipientes de 1 m^3.

6.3. Forjados

La estructura del edificio de aparcamiento, tiene una superficie de 162.500 m^2, ejecutada en 14 meses. Se ha utilizado el sistema de encofrado de mesas Hussor (Drace), con cuatro equipos que van pasando en travelling por cada una de las cuatro grúas disponibles para este trabajo (Figura 4), con desfase de una planta.

Cada uno tiene un frente de mesas igual al ancho del edificio (82 m) por 16 m (2 crujías), que se realiza en cuatro avances, dando una producción de más de 1.280 m^2/día, estando programada cada operación con un ciclo de 4 días, de la siguiente forma:

Día 1	– Desencofrado ciclo anterior, encofrado y ferrallado.
Día 2	– Hormigonado y tratamiento superficial.
Días 3 y 4	– Curado del hormigón y ejecución de pilares.

El primer día se dejaba preparada la ferralla de los dos ciclos que se hormigonaban al día siguiente, efectuándose en éste la colocación del hierro correspondiente para poder hormigonar por la tarde. Para esta operación se utilizó una bomba tipo Putzmeister. Los pilares se ejecutaron con grúa y cazo de 0,5 m^3.

Dada la importancia del cumplimiento del plazo para el cliente, se diseñó un programa de obra con una holgura final

Figura 3. Realización de la Cimentación.

Figura 4. Aspecto del desarrollo de los forjados.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

próxima al 10% del plazo total, para absorber posibles desviaciones e imprevistos.

4. FACHADA DEL APARCAMIENTO

El Aparcamiento de la nueva Terminal del Aeropuerto de Barajas, con un total de cinco plantas, presenta como principal novedad la carencia de paredes al uso (Figura 5). El cerramiento de fachada está formado por malla de acero inoxidable trenzada, modelo "Niágara", y cubre todas las plantas, de forma continua, tanto en altitud, como en longitud.

La altura total a cubrir es de 15,75 m, siendo entre plantas de 3,15 m. La fachada metálica se encuentra colgada, desde el forjado de cubierta, mediante un angular de acero inoxidable, en forma de "L", recibido a la estructura de hormigón mediante tacos de expansión.

La máxima modulación horizontal de los paños es de 4,00 m, que es el mayor ancho posible en la fabricación de la malla. Para el montaje de la misma, se coloca una varilla calibrada vertical, de acero inoxidable, aproximadamente cada 4,00 m. Las mallas se anclan, en toda su altura, con anillos que abrazan la varilla vertical, cada 300 mm de separación, y que cosen los paños consecutivos entre sí, sirviendo de sujeción lateral de las mismas. Los paños se tensan verticalmente mediante piezas de acero inoxidable, colocadas en los angulares superiores del peto de la cubierta y en los inferiores de la solera.

Figura 5. Fachada del aparcamiento.

La malla está formada por varillas paralelas de acero inoxidable, de 2,5 mm de diámetro, con desarrollo ondulado, separadas en altura 27 mm (Figura 6). Estas quedan unidas, entre sí, por otra del mismo diámetro que ata, cada dos paralelas, desde la parte más baja de la cresta inferior de la onda de la varilla superior, hasta la parte más alta de la cresta superior de la varilla inferior.

Finalmente, se ha colocado un peto, formado por bolardos metálicos y cables tensados como quitamiedos y medida de seguridad, en todo el perímetro del edificio y en los patios interiores (Figura 7).

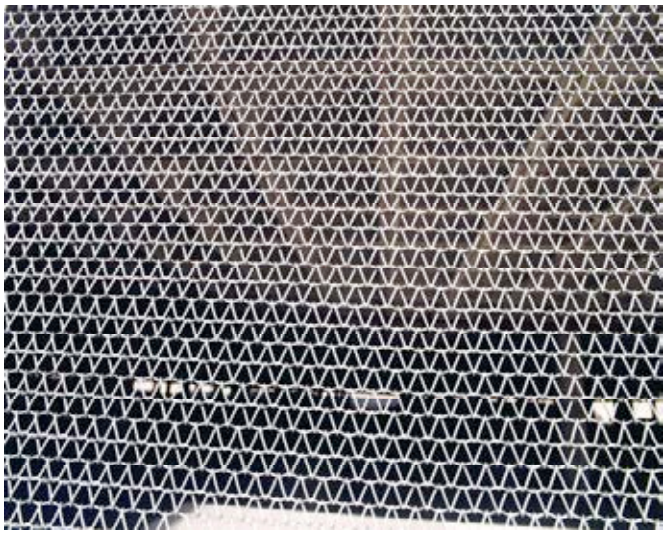


Figura 6. Malla de acero inoxidable modelo "Niagara".

Con este sistema se pretende evitar que, en caso de un incendio, se produzcan víctimas por asfixia, al dotar al edificio de una excelente ventilación, minorando a su vez los demoledores efectos que pudiera producir la onda expansiva de una explosión.

5. CUBIERTA ECOLÓGICA DEL APARCAMIENTO Y PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA MISMA

Para el Edificio de Aparcamiento de la Nueva Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas se ha construido la cubierta ecológica mayor del mundo con más de 56.000 m^2 de superficie, suponiendo un importante avance en el camino hacia la sostenibilidad de los procesos de la edificación.

Consiste en una cubierta plana invertida sobre la que se realiza una plantación de especies autóctonas capaces de adaptarse a las condiciones extremas del clima y que no necesita ningún tipo de mantenimiento ni riego, ni siquiera en épocas de sequía prolongada, ni produce raíces excesivas ni hojarasca que pueda perjudicar la impermeabilización o al funcionamiento de los sumideros.

Los beneficios obtenidos con la naturación de esta cubierta, se resumen en el positivo impacto medio-ambiental que se produce con la devolución al uso natural de una superficie equivalente a la del terreno utilizado en la construcción del edificio sobre el que se instala. Este tipo de actuaciones, con bajo mantenimiento, constituye una de las prácticas incluidas dentro de los criterios de diseño propios de la arquitectura bioclimática.

En el perímetro se colocó un peto de hormigón prefabricado, anclado al forjado por dos puntos, mediante un sistema de placa embebida en el elemento, casquillo de angular soldado a ésta y fijado con un taco mecánico. Tiene la doble misión de rematar estéticamente el edificio y de alojar las distintas capas de la cubierta propiamente dicha.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

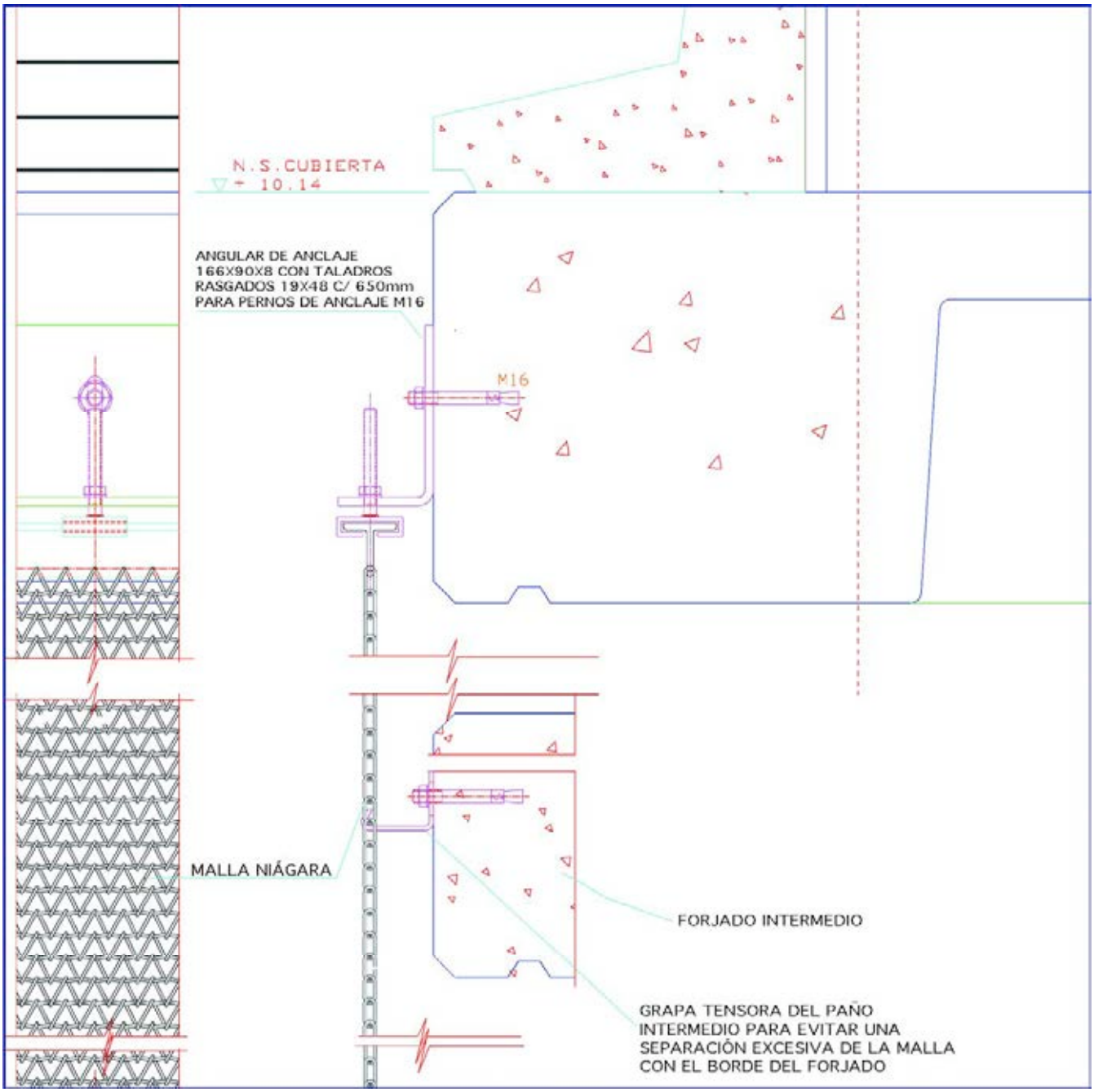


Figura 7. Esquema de colocación de la malla metálica.

Las pendientes se han realizado con hormigón celular de 350 kg/m^3 de densidad, con un mínimo del 1%. En los encuentros de los petos se dispusieron juntas de dilatación rellenas con poliestireno expandido de baja densidad y 2 cm de espesor. En la zona de sumideros, esta capa tiene un espesor mínimo de 2 cm. Sobre esta formación de pendiente ligera se aplica una capa de mortero de cemento fratasado de 25 mm de espesor, con una dosificación mínima de 250 kg de cemento por m^3, dejando una superficie resistente uniforme, lisa, limpia y seca (humedad máxima admisible 5%) y sin huecos, ni cuerpos extraños, ni resaltos superficiales mayores del 20% del espesor de la membrana impermeabilizante.

Posteriormente se prepararon las escocias o chaflanes, la entrega a paramentos, desagües y demás puntos singulares. Para permitir el secado por evaporación, tanto del agua residual como la de posibles lluvias, se colocaron unas chimeneas de ventilación cada 100 m^2.

En los encuentros con los petos, se dispusieron unas láminas, a modo de bandas de refuerzo, de betún elastómero. En los sumideros se rebajó suficientemente el soporte base para evitar que el agua de escorrentía quede encharcada, y se colocó una banda de refuerzo de lámina de betún elastómero, de 30 cm como mínimo, a su alrededor.

Previamente a la colocación de las láminas, y para facilitar su adherencia al soporte base, se aplicó sobre éste una capa de imprimación asfáltica a razón de 0,3 kg/m^2. Se extendió sobre toda la superficie de cubierta y el perímetro del peto hasta una altura suficiente para sobrepasar los 15 cm de la cota de terminación. Una vez seca, se colocaron refuerzos en los puntos singulares, (petos y desagües), antes de empezar a colocar la impermeabilización.

La membrana impermeabilizante está constituida por dos láminas de betún elastómero, la inferior armada con fieltro de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 8. Aspecto de la cubierta ecológica.

fibra de vidrio y peso medio de 4 kg/m^2 y la superior con armadura de poliéster reforzado y autoprotección de pizarra natural, anti-raíces, y peso medio de 5 kg/m^2. La colocación comienza desde el punto bajo de la pendiente.

Las entregas en los petos se han realizado con láminas autoprotegidas con gránulos minerales al quedar expuestas a intemperie. Los restantes puntos singulares, como los desagües, se realizaron colocando láminas de refuerzo antes de aplicar la impermeabilización. Las placas drenantes se dispusieron simplemente apoyadas sobre la membrana impermeabilizante, colocando un geotextil como capa filtrante encima de la placa drenante, para evitar paso de finos y que se colmate la misma. A continuación se extendió el panel retenedor de agua, simplemente apoyado sobre el geotextil.

Sobre el retenedor de agua se colocó el substrato, en dos capas, hasta alcanzar un espesor aproximado de 6 cm, en que se efectuó la plantación de distintas variedades de *Sedum*, planta extremófila que los estudios experimentales han determinado como la más adecuada para las condiciones la zona de Madrid, siendo las variedades adoptadas, las siguientes: *sedum floriferum, sedum reflexium, sedum album, sedum expuium y sedum oreganum* (Figura 8).

Para proteger el substrato vegetal, ayudarle a mantener la humedad y evitar arrastres de polvo por el efecto del viento se terminó la superficie con el extendido de una capa fina de gravilla de granulometría 5/12 mm de árido volcánico color rojo pardo, aspecto quebrado y poroso y densidad 950 kg/m^3, que no penaliza apenas la carga sobre cubierta y que produce una mejora importante en el funcionamiento de la cubierta, estabilidad del substrato y aspecto estético. Su puesta en obra se realizó por bombeo (Figura 9).

La naturación de la cubierta del aparcamiento presenta notables beneficios desde diversos puntos de vista: arquitectónico, constructivo, estético y medio-ambiental, contribuyendo a satisfacer la demanda social creciente en relación con la sostenibilidad de los procesos constructivos.

Entre las ventajas identificadas pueden destacarse las siguientes:

- Aislamiento térmico.
- Ahorro energético, derivado del punto anterior.
- Enfriamiento en verano de los espacios bajo cubierta, debido a la evaporación.
- Protección contra la radiación solar.
- Protección de la impermeabilización.
- Absorción de ruido.
- Retención de una parte del agua de lluvia, devolviéndola al ciclo natural.
- Recuperación de la superficie de la cubierta para la naturaleza.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

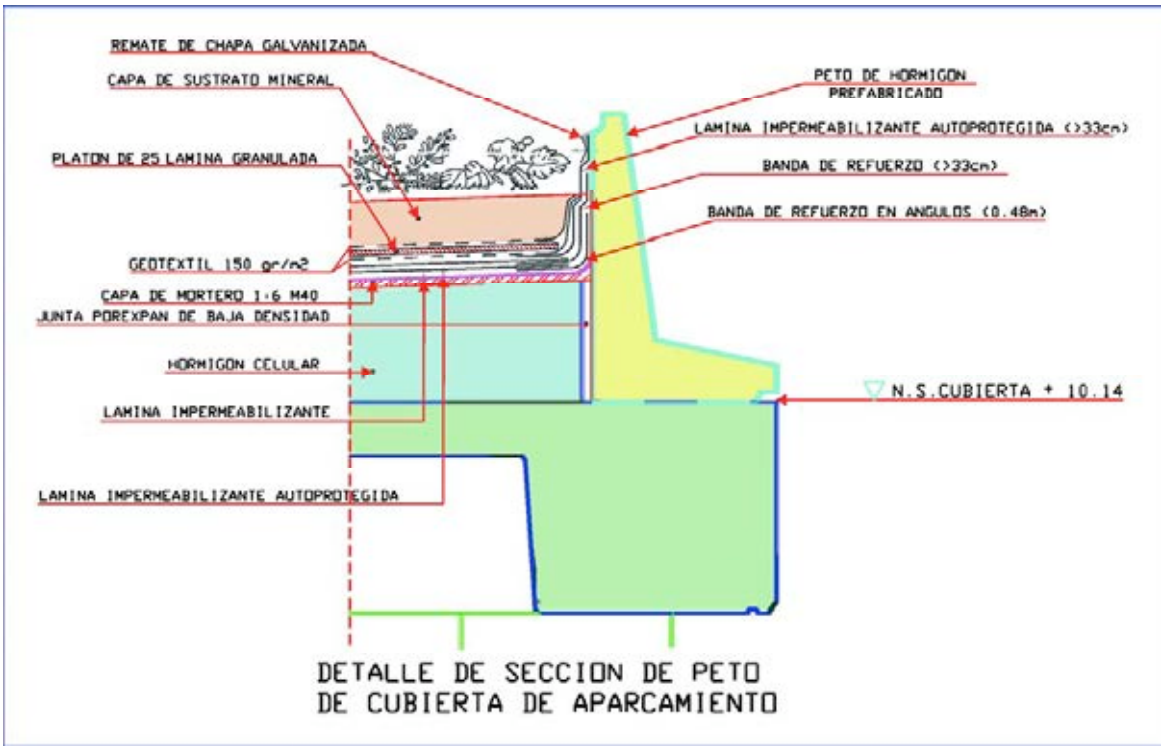


Figura 9. Sección de la cubierta ecológica.

– Ayuda a crear un microclima más favorable.
– Mejora ambiental del aire, proporcionando oxígeno.

6. CONEXIONES Y ACCESOS

6.1. Tramos del Túnel de Servicios adyacentes al edificio Satélite

Dentro de las obras adjudicadas a Dragados correspondientes al "Plan Barajas", para la ampliación del Aeropuerto de Madrid, se ha construido parte del Túnel de Servicios Aeroportuarios que conecta el Nuevo Edificio Terminal con el Edificio Satélite [4], cruzando bajo la pista 18R 36L (Figura 10).

Figura 10. Vista aérea del túnel de servicio.

La obra realizada por Dragados se divide en dos tramos, el II, comprendido entre las construcciones anteriormente mencionadas, tiene una longitud de 396 m, y el I, con 241 m, que discurre desde el Edificio Satélite hacia el Este.

Dentro de ellos podemos distinguir dos zonas, la primera con una sección tipo normal y la segunda con unas embocaduras, a cada lado del Edificio Satélite, que constituyen las Estaciones de Pasajeros del tren de conexión entre terminales, las cuales disponen unos sobreanchos para hacer compatible la circulación de los vehículos, por los viales laterales, con el movimiento de maniobras del Automatic People Mover (APM), ambos situados en el nivel superior.

El Túnel de Servicios Aeroportuarios es una estructura de hormigón armado, en dos alturas, constituida cada una de ellas, por tres ojos. Los del nivel inferior albergan todo el Sistema Automático de Transporte de Equipajes (SATE), mediante cintas transportadoras, mientras que por el superior discurren tanto el APM (tren de transporte de viajeros entre terminales), por el vano central, como los viales de servicio del Aeropuerto, por los laterales, con dos carriles en cada sentido [2].

Como complemento de la obra subterránea se han construido 6 núcleos de ventilación, 2 salidas de emergencia y un aljibe de 150 m^3 para dotación de incendios.

6.1.1. *Características Geométricas*

El nivel superior tiene una altura de 6 metros, excepto en la zona comprendida entre la estructura de paso del arroyo, el colector y la embocadura con el Edificio Satélite, en el tramo

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

II, y toda el área correspondiente a esta última en el I. En ellas se alcanza un gálibo próximo a los 11 metros.

En el nivel inferior la altura tipo es de 4,5 metros, excepto en los 80 metros más próximos al Edificio Satélite, en el tramo II, donde se llega a los 8,6 metros. En el I, los 200 metros más cercanos a dicha construcción, tienen un gálibo variable entre 4,5 y 8,4 metros.

El ancho de los vanos laterales, en ambos niveles, es de 10,92 metros entre el eje del pilar, de ese lado, y el muro. El del central de 13,10 metros y corresponde a la distancia entre los ejes ambas alineaciones de pilares.

6.1.2. Características Constructivas

La sección tipo normal del túnel es de hormigón armado, salvo la parte superior que está constituida por vigas pretensadas con losa de compresión de 30 cm de hormigón armado.

En las zonas de las embocaduras se han utilizado vigas de acero laminado bajo una losa, de 30 cm de hormigón armado, trabajando el conjunto como estructura mixta.

El área intermedia, donde se ha realizado el desvío del colector existente, se ejecutó mediante losas alveolares prefabricadas de hormigón pretensado.

Las cifras más significqativas de esta obra son las siguientes:

Excavación	1.347.023 m^3
Terraplén	924.082 m^3
Encofrados	103.903 m^2
Hormigón H-300	117.990 m^3
Acero Corrugado B-500-S	15.526.256 kg
Acero Laminado en vigas	5.793.537 kg
Pantallas de Hormigón Armado de 80 cm espesor	16.606 m^2
Pilotes 1,25 m de diámetro	12.669 m
Vigas de Hormigón de 1,70 m de canto	5.708 m

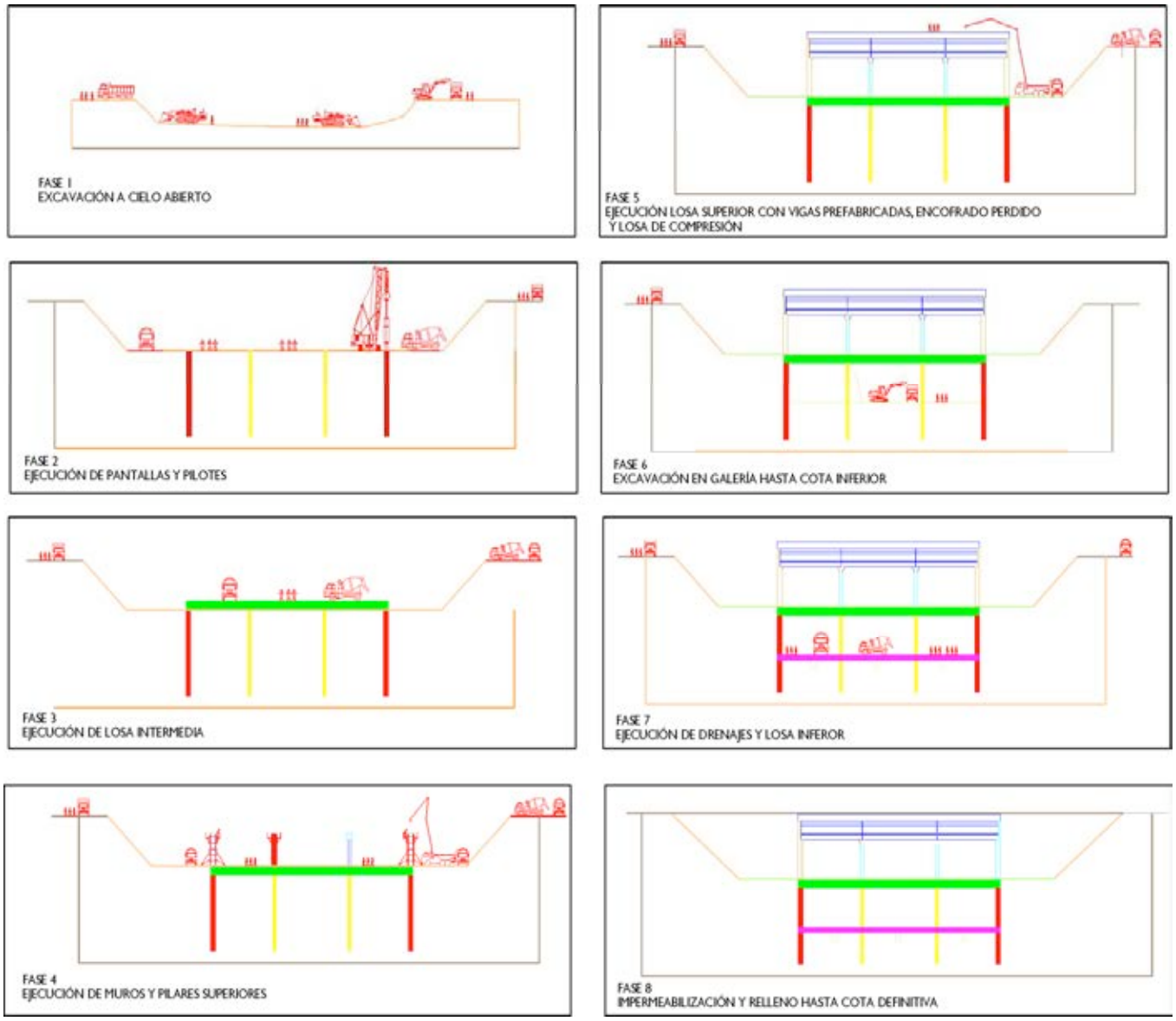


Figura 11. Secciones del proceso constructivo.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

6.2. Accesos a la nueva área Terminal

Conjuntamente con la obra de construcción del aparcamiento de Barajas, se ha realizado la conexión de éste con la nueva terminal, las dársenas de salida y llegada de viajeros e intercambiador de transporte y los accesos próximos, que incluyen las obras necesarias para diferenciar los distintos tráficos que llegan a la Terminal.

Estas actuaciones constituyen un conjunto de infraestructuras para permitir la comunicación por tierra a los usuarios del nuevo aeropuerto.

Los accesos a la Nueva Área Terminal están comprendidos entre el viario denominado Eje Norte-Sur, al Oeste, y el edificio Terminal, al Este. Por el Sur limita con el encauzamiento del Arroyo de la Plata, y por el Norte, a unos 700 m, se encuentra el Arroyo de Valdebebas. Las obras comprenden la realización de los distintos accesos, tanto a la Nuevo Área Terminal como al aparcamiento y las conexiones de éstos con el futuro eje Norte-Sur (Figuras 12 y 13).

Figura 12. Construcción de los accesos.

Figura 13. Aspecto general de las vías de acceso.

Se ha proyectado un trazado sencillo, diferenciando claramente las distintas clases de tráfico: viajeros, taxis, autobuses y edificio aparcamiento, con un conjunto de 20 ejes.

Se han ejecutado 10 estructuras de hormigón armado, para pasos elevados (Figura 14), y dos viaductos de acceso a dársenas, también de hormigón, con 8 vanos en el de la zona Norte y 9 en el de la Sur. Otras actuaciones destacables son el desvío del encauzamiento del Arroyo de la Plata, 60 m hacia el Sur, con una longitud total de 580 m, por interferir en las obras. También ha sido necesario demoler un tramo de la M-110.

Para la zahorra artificial utilizada en el firme, se ha reciclado el material obtenido de la demolición de la M-110, entre Barajas y Alcobendas, compuesta por la mezcla de la zahorra, aglomerado, y hormigón de la barrera rígida de seguridad que existían en esa carretera. Esta operación constituye una novedad, tanto técnica como medioambiental, en España.

Las unidades de obra, conjunto de accesos, dársenas y aparcamientos, más significativas son las siguientes:

Movimiento de tierras:	4.000.000 m^3
Acero para armaduras:	15.000.000 kg
Hormigón:	204.000 m^2
Mezclas asfálticas en caliente:	162.000 m^2

Figura 14. Ejecución de un paso elevado.

7. RECICLADO DE MATERIALES

En las obras de acceso a la nueva terminal y aparcamientos del aeropuerto de Barajas, hubo que demoler un tramo de firme de la autovía de Barajas a Alcobendas, circunvalación de la pista nº 3, M-110, para poder ejecutar la excavación de los accesos, al estar situada la rasante a un nivel inferior al original. El material obtenido se recicló, para utilizarlo como zahorra artificial en el nuevo firme.

En total se demolieron 21.000 m^2 de pavimento, compuesto por 25 cm de mezclas asfálticas y 25 cm de zahorras artificiales. También se retiraron 2.000 m lineales de barrera de seguridad, New Jersey (Figura 15).

Para esta operación se utilizó un martillo hidráulico de 2.500 Kg, montado en una retroexcavadora de 30-35 t de peso. La carga del material se realizó de forma selectiva, según el producto extraído: aglomerado, hormigón ó zaho-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

rras artificiales, mediante una pala cargadora, transportándolo a la planta de procesado con camiones de tres ejes de 20 t.

Como resultado de dicho proceso se obtuvieron 18.000 t, cuyo desglose fue el siguiente:

– Aglomerado asfáltico: 9.000 t
– Zahorras artificiales: 6.000 t
– Hormigones: 3.000 t

Figura 15. Demolición de pavimento (para reciclar).

La maquinaria de trituración y cribado utilizada estaba compuesta por los siguientes elementos (Figura 16).

– Equipo móvil de machaqueo GIPO R127 FDR con una tolva de alimentación de 10 m , un alimentador vibrante de 1 x 3,3 m, una precriba vibrante de 1,2 x 2,3 m y una trituradora de impactos de 1,2 x 0,92 m de boca.

– Equipo móvil de cribado GIPO S157 DR formado por varias cintas transportadoras y una criba de 8 m , de dos pisos y medio.

Para la fabricación de la zahorra artificial se ensayaron tres fórmulas granulométricas, con distintos porcentajes, llegándose a la conclusión de que la óptima estaba constituida por las siguientes proporciones del producto extraido: 50 % del

Figura 16. Instalación de tratamiento de áridos.

procedente de aglomerado y el resto (50 %) formado por un 33 % de hormigón y un 67 % de zahorras artificiales.

La base granular, así obtenida, con un huso Z 40, se ha utilizado en los accesos a Barajas como componente del firme con un nivel de tráfico de categoría T0 y T1 (según pliego PG3).

REFERENCIAS

[1] Hesse Martín, José Manuel: “Planteamiento aeroportuario de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Lamela, Carlos; Moya, Paz: “Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: “Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] Fernel Fernández, José Pedro: “Edificio Satélite de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal

Steel structure and prestressed façade of the new Terminal Building

Luis Viñuela Rueda
Ingeniero de Caminos
FCC Construcción, S.A.

José Martínez Salcedo
Ingeniero de Caminos
FCC Construcción, S.A.

RESUMEN

El Nuevo Edificio Terminal del Aeropuerto de Barajas, proyecto de los arquitectos Lamela y Rogers, es una de las más grandes construcciones de edificación abordadas en España en los últimos años. Su singularidad técnica viene dada por el diseño espacial de su estructura metálica (25.000 toneladas de acero S355 y S460), con todas sus barras curvas, y sus fachadas de hasta 15 metros de altura, resueltas con una tensoestructura que se ancla en la estructura de cubierta y el forjado inferior.

Se describe en este artículo el diseño y los sistemas constructivos de la estructura metálica de cubierta y la fachada tensada y, en particular, la interacción estructura-fachada.

Palabras clave: Terminal, Aeropuerto, Barajas, Estructura metálica, Fachada tensada, Tensoestructura.

SUMMARY

The new airport terminal Madrid-Barajas, from architects Lamela and Rogers, is one of the main, if not the main building project that has been undertaken in Spain in recent years. The design of the steel structure of the roof, with more than 25.000 t of S355 and S460 steel, has due to its shape faced particular topics with all strongly curved elements. Its façade with a height up to 15 meters, is an impressive prestressed façade tensioned between the main beams of the steel roof and the supporting concrete structure.

This paper will describe some details of the design and construction of the roof and façade. The interaction of the roof structure and the prestressed façade was really challenging.

Key words: *Airport, Terminal, Barajas, Steel structure, Prestressed façade, Tensostructure.*

1. INTRODUCCIÓN

La nueva Terminal del Aeropuerto de Barajas (Madrid), es una de las construcciones integrada en el conjunto del Plan Barajas (Figura 1) [1] [2]. Dentro de este conjunto, y como la edificación más importante, se ubica el Nuevo Edificio Terminal que comprende tres bloques lineales contiguos y la cubierta de los accesos. De ellos destaca, por sus dimensiones, el llamado "Dique" con más de un kilómetro de longitud (Figura 2).

Esta obra se construyó por una UTE formada por cinco empresas (ACS-FCC-FERROVIAL-NECSO-SACYR) y la magnitud de la misma se manifiesta en sus mediciones (Figura 3). La estructura metálica emplea del orden de 30.000 toneladas de acero, convirtiéndose en el mayor proyecto y obra de estructura metálica abordado en España.

En lo que se refiere tanto a la estructura metálica de cubierta como a la mayoría de sus fachadas, el diseño arquitectónico y estructural es similar en todos estos edificios.

Gran parte de la estructura (pilares y parte del dintel) quedará vista, por lo que en su diseño se atendió a la perfección

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 1. Planta del Nuevo Plan Barajas.

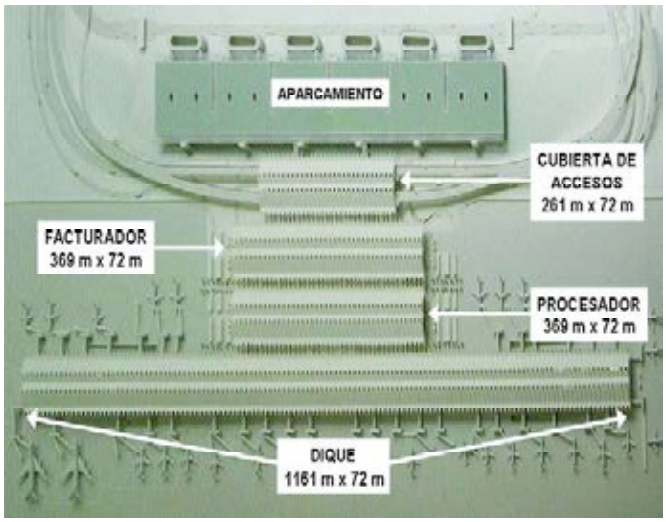


Figura 2. Planta del Nuevo Edificio Terminal.

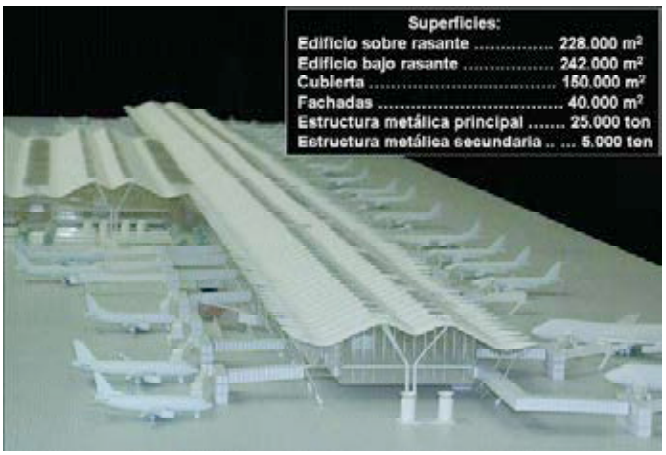


Figura 3. Maqueta y mediciones.

estética general y de diseño de todos sus detalles, interviniendo el equipo de arquitectos responsables en la aprobación de los más mínimos aspectos que pudiesen tener incidencia formal. Evidentemente la fachada es el otro elemento que da la personalidad arquitectónica al edificio.

La estructura de cubierta está formada por unos pórticos metálicos, de geometría muy compleja, dado que estos son curvos en alzado, siendo la estructura de cubierta que los une también curva. Tiene en cambio la ventaja de que esta misma forma geométrica se repite a lo largo de los edificios citados, tal como se observa en las fotografías de la maqueta y de la obra que se muestran en las Figuras 3 y 4.

La estructura principal consiste en unos pórticos con un dintel de directriz fuertemente curva, separados 9 metros (Figuras 5 y 6). Entre los mismos se sitúa un sistema transversal de vigas de directriz circular y unas correas que apoyan en ese sistema transversal de vigas, siendo la directriz de las correas paralela a la del pórtico. Los dinteles, dos a dos, apoyan en un sistema de pilares tubulares situados en cuatro alineaciones; esto hace que la separación entre pilares sea de 18 metros, mientras que la de los pórticos era de 9 metros. Estos pilares, los dos centrales en V y los dos extremos en Y, están inclinados, lo que complicaba el posicionamiento de la estructura del pórtico, que no era estable hasta que no estaba cerrada. El ancho total de la viga dintel es de 72 metros y la separación entre dinteles de 9 metros. El radio de curvatura de las vigas transversales entre pórticos, es de 3’5 metros. Uniendo

Figura 4. Pórtico tipo de estructura principal.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

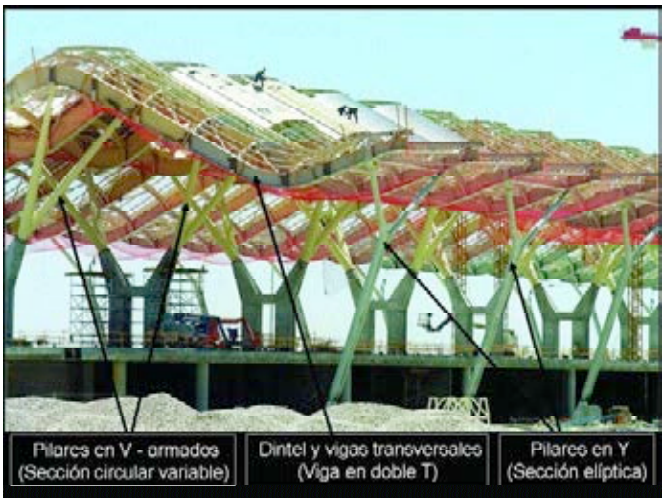


Figura 5. Elementos de la estructura-I

Figura 6. Elementos de la estructura-II.

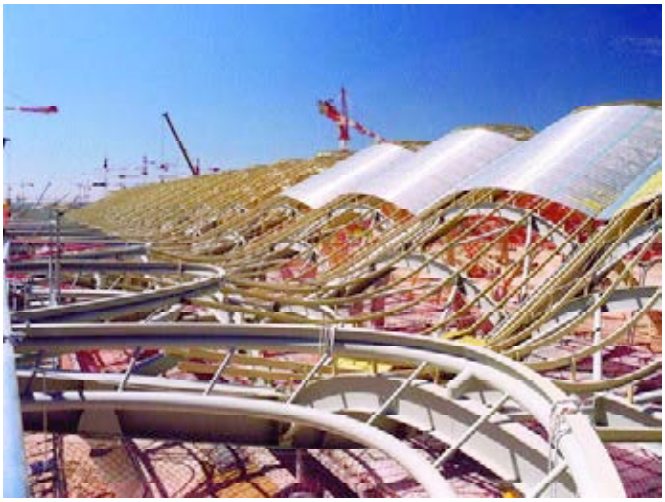


Figura 7. Vista superior de cubierta.

Figura 8. Vista inferior de cubierta.

los pórticos se colocan elementos tubulares de arriostramiento en cubierta. Un sistema de correas sobre las vigas transversales, sobre las que a su vez se coloca la cubierta tipo Kalzip, completa la estructura.

Al tener los edificios unas dimensiones tan importantes, era necesario situar juntas de dilatación. Tanto en la estructura de cubierta como en fachadas, estas juntas se sitúan cada ocho módulos (72 metros). Estas juntas se efectúan en la propia estructura sin duplicar pilares ni elementos de fachada.

De la complejidad geométrica del edificio dan idea las fotos de estructura que se adjuntan: en la vista superior de la estructura de cubierta (Figura 7) se observa un gran conjunto de formas curvas, en gran parte perfiles tubulares. En la vista interior (Figura 8), con un módulo en el que se ha colocado parcialmente el falso techo de bambú, se observa la gran cantidad de lucernarios y que el ala inferior del dintel del pórtico, queda a la vista.

En los extremos del pórtico se sitúan unas fachadas tensadas que serán elementos decisivos en el cálculo del pórtico, dado que en cada uno de ellos era necesario efectuar un tesado que alcanzaba, como más tarde se explicará, las 70 toneladas.

Podemos señalar como características que hacen singular esta cubierta, de reducida luz (Figura 9):

- La gran importancia y repercusión económica de su diseño.
- La gran deformabilidad proveniente de sus formas y el comportamiento espacial de la estructura. La forma fuer-

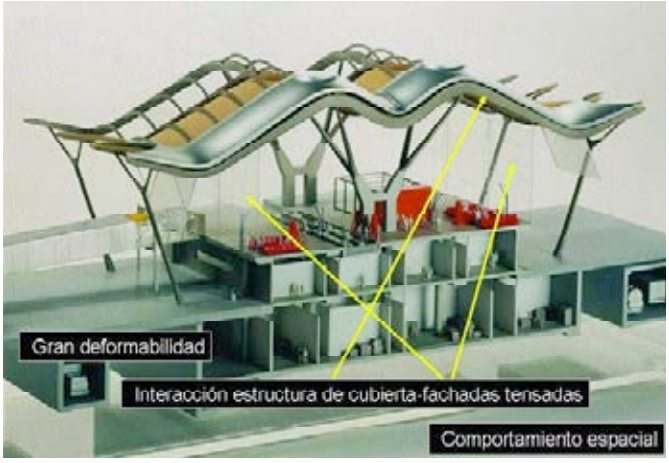


Figura 9. Esquema de características.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

temente curva del dintel y de las vigas transversales al mismo hace que la estructura tenga poca eficacia estructural. Esto se agrava al ser los pilares también inclinados y no situarse en el plano del pórtico.

- La interacción estructura-fachadas tensadas.

2. ESTRUCTURA METÁLICA PRINCIPAL

A continuación se describirán los distintos elementos que constituyen la estructura principal, formada por los pórticos y la estructura entre los mismos. Su diseño se efectuó de modo que todas las soldaduras se efectuasen en taller, mientras que las uniones en obra fuesen atornilladas. Fue excepción a esto el ala inferior del dintel, en la que por motivos estéticos, ya que quedaba vista, se efectuó un empalme soldado en obra.

En formas, prácticamente son exactamente iguales todos los pórticos, cuya definición se muestra en la Figura 10. No obstante, a pesar de la aparente similitud de todos los pórticos, de los que había que fabricar 244 unidades, la gran influencia en sus deformaciones proveniente de las fachadas tesadas obligó a calcular (y después construir) 24 tipos distintos, que se diferenciaban entre sí, fundamentalmente, por las contraflechas de construcción.

Como ejemplos significativos, podemos señalar que cuando el pórtico tiene fachada por ambos lados, las flechas verticales en esas alineaciones de fachada son del orden de 70 mm. Mayor problema se presenta cuando la fachada tesada está sólo por un lado; en este caso, además de los movimientos verticales que alcanzaban los 145 mm, se producía un movimiento horizontal que alcanzaba los 100 mm. El 90% de las contraflechas, provenían de los tesados de la fachada. Esto hacía necesario, para que no se perdiese la correcta alineación de la fachada de más de 1 km de longitud, dar las correspondientes contraflechas horizontales y verticales al pórtico, en taller.

El dintel del pórtico es una viga armada en doble T (Figura 11), de canto variable entre 0’75 y 1’5 metros. Sus alas están formadas por unas chapas de 500 x 30 mm, y su alma se forma con chapa de 15 mm de espesor. Este gran canto y estos fuertes espesores, en relación a la reducida luz del dintel, no impiden que las deformaciones sean muy importantes. La calidad del acero es, en general, S355 J2G3, con excepción de unas pequeñas zonas de las alas, más solicitadas, en las que se colocó S420N; así se consigue el requerimiento arquitectónico, por quedar vistas, de mismo ancho y espesor en las chapas de las alas en todas las zonas.

En el dintel se dejan (Figuras 12 y 13), soldándoles en taller, los rigidizadores que recogerán las vigas transversales, que se atornillarán a los dinteles en obra. Las vigas transversales cuyo radio es de sólo

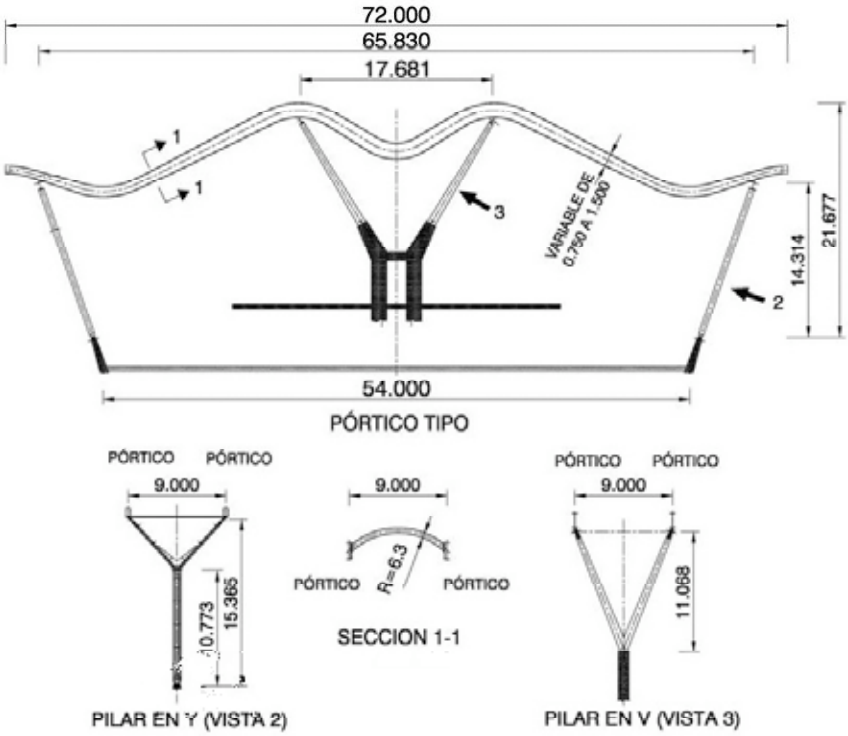


Figura 10. Definición geométrica del pórtico tipo.

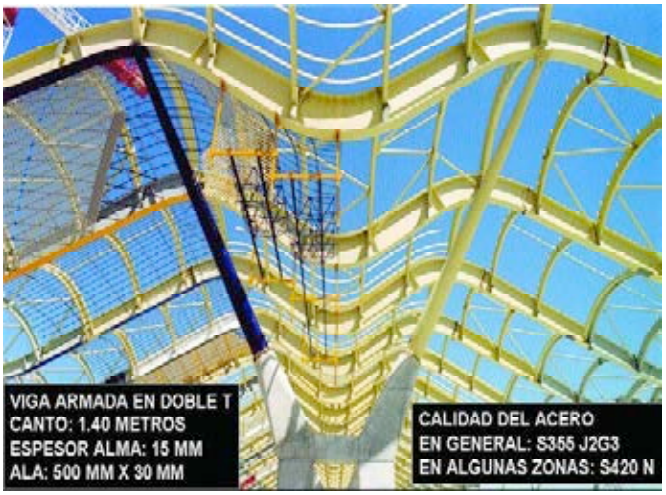


Figura 11. Características del dintel.

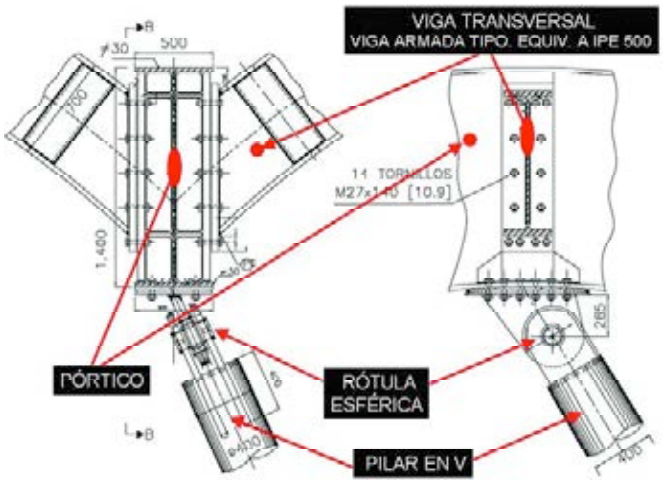


Figura 12. Unión dintel-vigas transversales.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 13. Dintel: fabricación en taller.

3'5 metros, son en general según cálculo IPE 500; no obstante, la imposibilidad de curvar con ese radio estos perfiles obligó a hacerlas armadas. En la alineación de pilares las vigas transversales tienen 700 mm de canto.

En la zona más curva el radio de la chapa del ala es de 3.5 metros. La curvatura tan importante de este dintel, con una relación radio de curvatura/canto de solo 2'5, obligó a considerar en su cálculo la ley de tensiones hiperbólica real, no lineal, de las secciones en vigas curvas. Ello hace que las tensiones sean mayores en el ala de menor radio (respecto a la circunferencia de su curvatura). Por ello, en esa ala más interna (Figura 13) se situaron lo que antiguamente se conocía como atiesadores de ala y que hoy apenas se utilizan; no obstante, fue necesario para reducir las tensiones transversales en las alas por las fuerzas de desvío.

Del pilar de hormigón nace un solo pilar metálico que se empotra en el mismo, de diámetro 750 mm, que se divide en los dos brazos a pocos centímetros del pilar de hormigón formando los llamados pilares en V, que son los pilares centrales del pórtico (Figuras 14 y 15). El ángulo que forman los dos brazos del pilar es de 45º y sobre los extremos de los brazos apoyan dos pórticos contiguos. Su sección transversal es circular, de diámetro variable, desde 750 mm en su unión con el hormigón, hasta 400 mm en su encuentro con los dinteles. Se forman con chapa de 16 mm, realizando dovelas en taller de pequeña longitud para que permitan darles la forma cónica.

Figura 14. Pilares en V: vista general.

En su base (Figuras 16 y 17), cuando se desvían a pocos centímetros del pilar de hormigón, se hace necesario colocar internamente unos rigidizadores que recojan las tensiones de desvío, como se observa en la fotografía adjunta (Figura 17). Los rigidizadores son tres chapas formando triedro, que se unen en un redondo central de 40 mm de diámetro, al que se sueldan las tres chapas. Sobre estos rigidizadores, y actuando los mismos como chapa dorsal para recoger las soldaduras, se realiza el empalme de los tubos.

En el otro extremo, en su encuentro con el dintel, se realiza una unión articulada entre ambos, pilar y dintel (Figura 18). Esta unión queda poco compensada con la del otro brazo, dado que sólo queda unido por el elemento transversal curvo, por tanto menos eficaz que si fuese un tirante convencional recto. Al no estar el pilar en el mismo plano que el pórtico, para evitar tensiones indeseadas y para permitir la libre rotación del dintel en su plano respecto del

Figura 15. Pilares en V: esquema resistente.

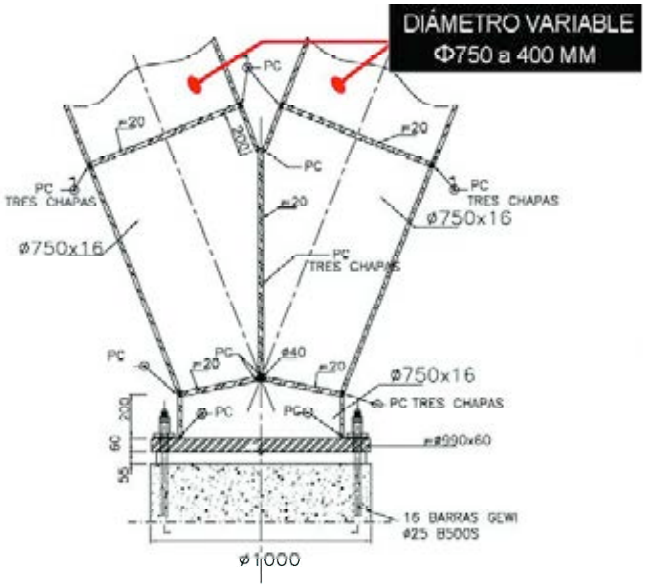


Figura 16. Base de pilar en V: definición.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 17. Base de pilar en V: fabricación.

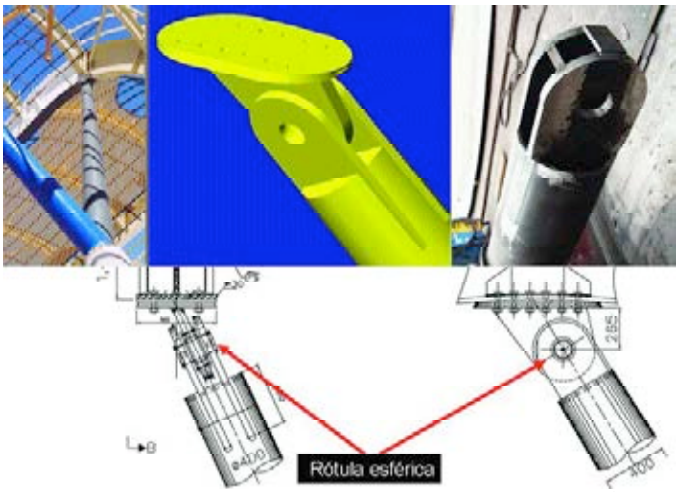


Figura 18. Encuentro pilar en V-dintel.

pilar, se situó en la conexión una rótula esférica libre de mantenimiento (sus superficies son de teflón).

Aunque no suele ser muy habitual en la ingeniería civil el uso de estos tipos de elementos, ya habían sido utilizados por los autores de forma satisfactoria en otras obras dado que además de su eficacia, su coste no es importante. Sí es importante, al necesitar chapas mecanizadas para su alojamiento, que el taller que fabrique estos elementos tenga suficiente nivel de calidad [3].

Los pilares en Y son los pilares extremos del pórtico. Al igual que en el pilar en V, nacen de la estructura de hormigón como un pilar único que después se divide.

Este pilar (Figuras 19 y 20) está formado por dos perfiles elípticos muy poco separados en su inicio, de dimensiones 480 x 240 mm y un espesor de 14 mm, que nacen de la estructura de hormigón y siguen paralelos hasta un punto cercano al dintel en el que se abren prácticamente 90º entre ambos, hasta encontrar los dos dinteles que apoyan en ellos. Estos dos tubos se empresillan entre sí en la zona inferior, en la que están paralelos. Dada su gran inclinación, mucho mayor que la de los pilares en V, se propuso y aceptó unirlos en su cabeza, en su unión con los pórticos, con un tirante que recoge la componente horizontal. La calidad de estos tubos es S355J2 y son el perfil elíptico más grande que se lamina.

Figura 19. Pilares en Y: esquema resistente.

Figura 20. Pilares en Y: base de anclaje

El apoyo del doble pilar en el hormigón (Figura 20) se realiza con una rótula unidireccional, a base de un bulón convencional perpendicular al plano del pórtico, dado que en ese apoyo el giro se produce en el plano de los pórticos. En la unión con los pórticos, al igual que en el caso de los pilares en V, al no estar el pilar en el plano del pórtico se coloca una rótula esférica libre de mantenimiento.

El croquis de la Figura 21 muestra las características de estos pilares.

El quiebro de los perfiles (Figura 22), cuando se empiezan a separar, es muy fuerte, dado que el radio de curvatura de los mismos es de sólo 1’4 metros.

En esa zona se unen con una chapa ambos perfiles, lo que obligó a estudiar con elementos finitos no lineales esta zona en la que los axiles en el pilar se deben desviar bruscamente, dado que no existe literatura técnica, entre las Normas que estudian las uniones tubulares, que cubra esta unión.

Las Figuras 23 y 24 muestran la definición del modelo y una pantalla de los resultados.

Se observa que en la zona de quiebro se produce un aplastamiento del tubo elíptico (Figura 24), apareciendo las correspondientes tensiones de flexión de las paredes en esa zona.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

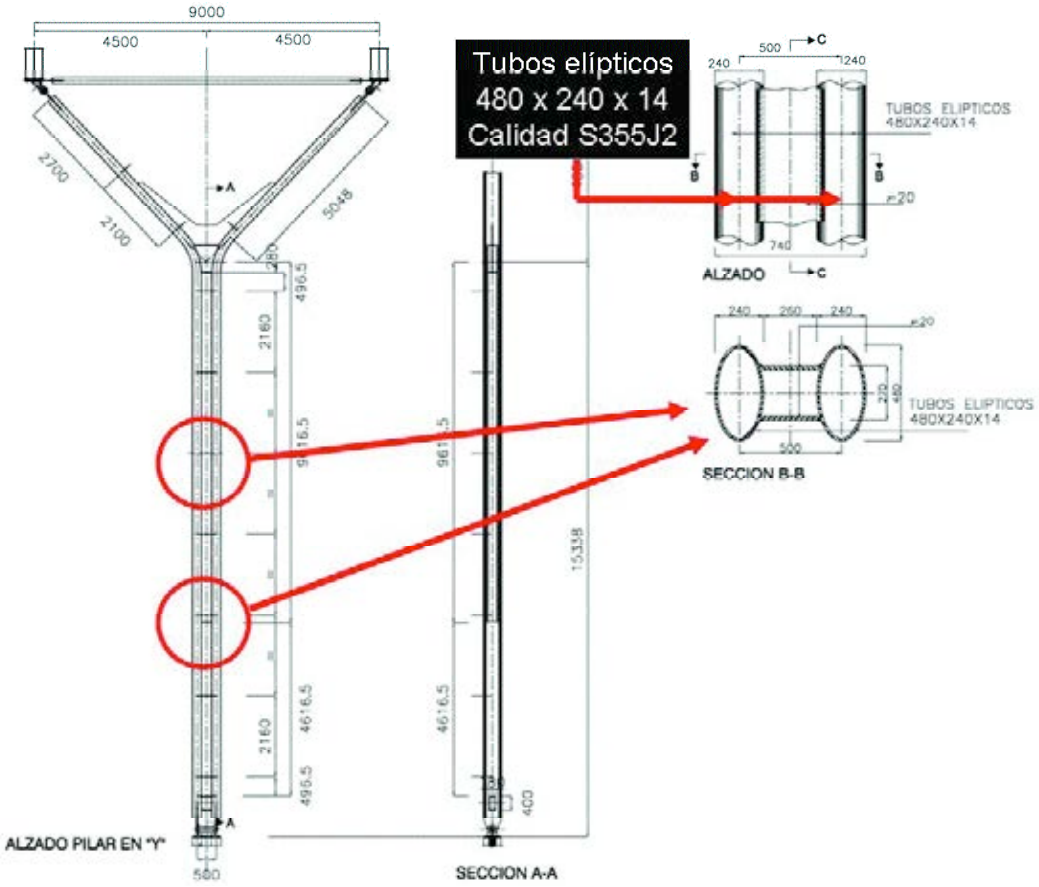


Figura 21. Pilar en Y: definición.

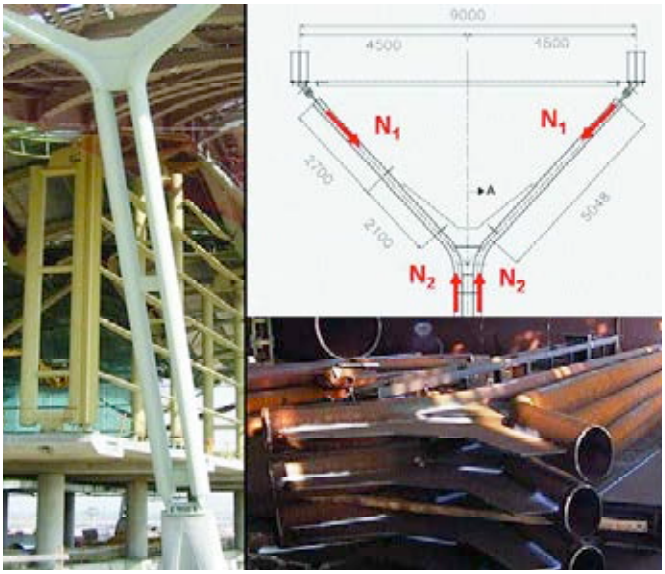


Figura 22. Pilar en Y: zona de bifurcación.

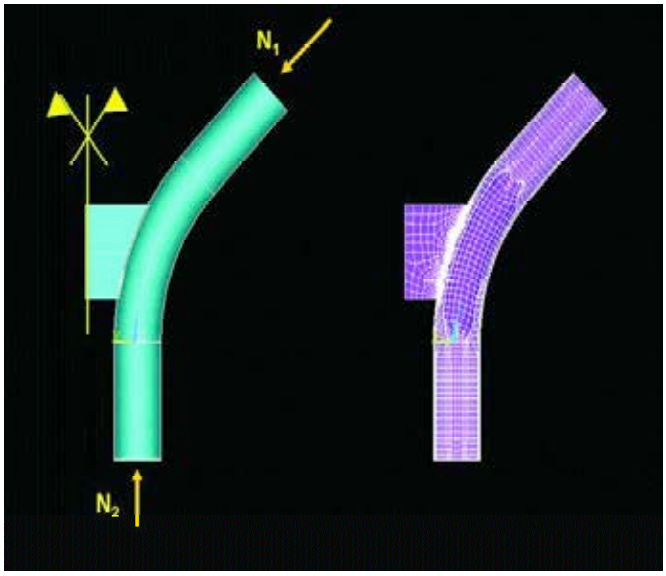


Figura 23. Pilar en Y: modelo de elementos finitos.

Por último señalar, respecto a otros elementos:

- Las correas son perfiles laminados UPN, pero que, por las fuertes curvaturas, fue necesario curvar en frío.
- Los arriostramientos y los perfiles de lucernarios son, prácticamente todos, perfiles tubulares, curvados en el caso de los lucernarios.

En las zonas comunes de dique con procesador y facturador, los pórticos de cada edificio se unen con el contiguo, situado en su mismo plano, con una unión articulada (rótula), dado que la cubierta tendrá continuidad en esas zonas.

3. MONTAJE DE LA ESTRUCTURA METÁLICA PRINCIPAL

La construcción comenzaba, como es evidente, con los trabajos en taller que formaban la estructura soldada, para des-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

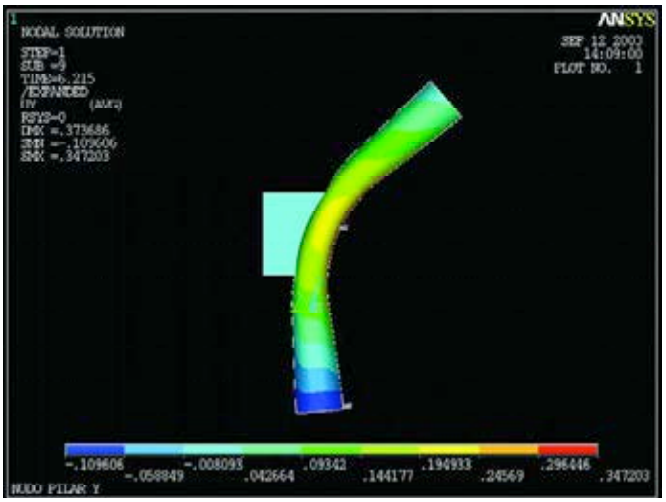


Figura 24. Pilar en Y: resultados del modelo.

Figura 25. Montaje en blanco en taller.

pués atornillarla en obra. Dada la compleja geometría con unas grandes contraflechas, la unión de los arriostramientos de cubierta con los pórticos obligaba a ser muy cuidadoso en la orientación de las cartelas que recogían esos arriostramientos. A pesar de la garantía que ofrece el corte de chapas por control numérico, se consideró oportuno realizar un montaje en blanco de dos pórticos, con sus correspondientes arriostramientos (Figura 25).

El montaje en obra, se pensó en realizarlo con las mismas grúas torre que atendían a la construcción de la estructura de hormigón y que se señalan con flechas en la fotografía adjunta (Figura 26). Estas grúas torre, unas fijas y otras sobre carriles, se situaban en los pasillos entre los distintos cuerpos de los edificios (por ejemplo entre dique y procesador, procesador y facturador, etc.) y se eligieron con una gran potencia, del orden de 16 toneladas a 40 metros, a fin de que pudiesen montar la estructura principal de pórticos. Este montaje se haría con las grúas "en retirada" dado que el espacio que ocupan queda "tapado" por la estructura metálica a montar. La estructura secundaria se pensaba montar con pequeñas grúas, moviéndose sobre los forjados de hormigón.

Hay que señalar que por la inclinación de los pilares, tanto en el sentido del pórtico como en el perpendicular, el montaje de la estructura no admitía el montaje de pequeños elemen-

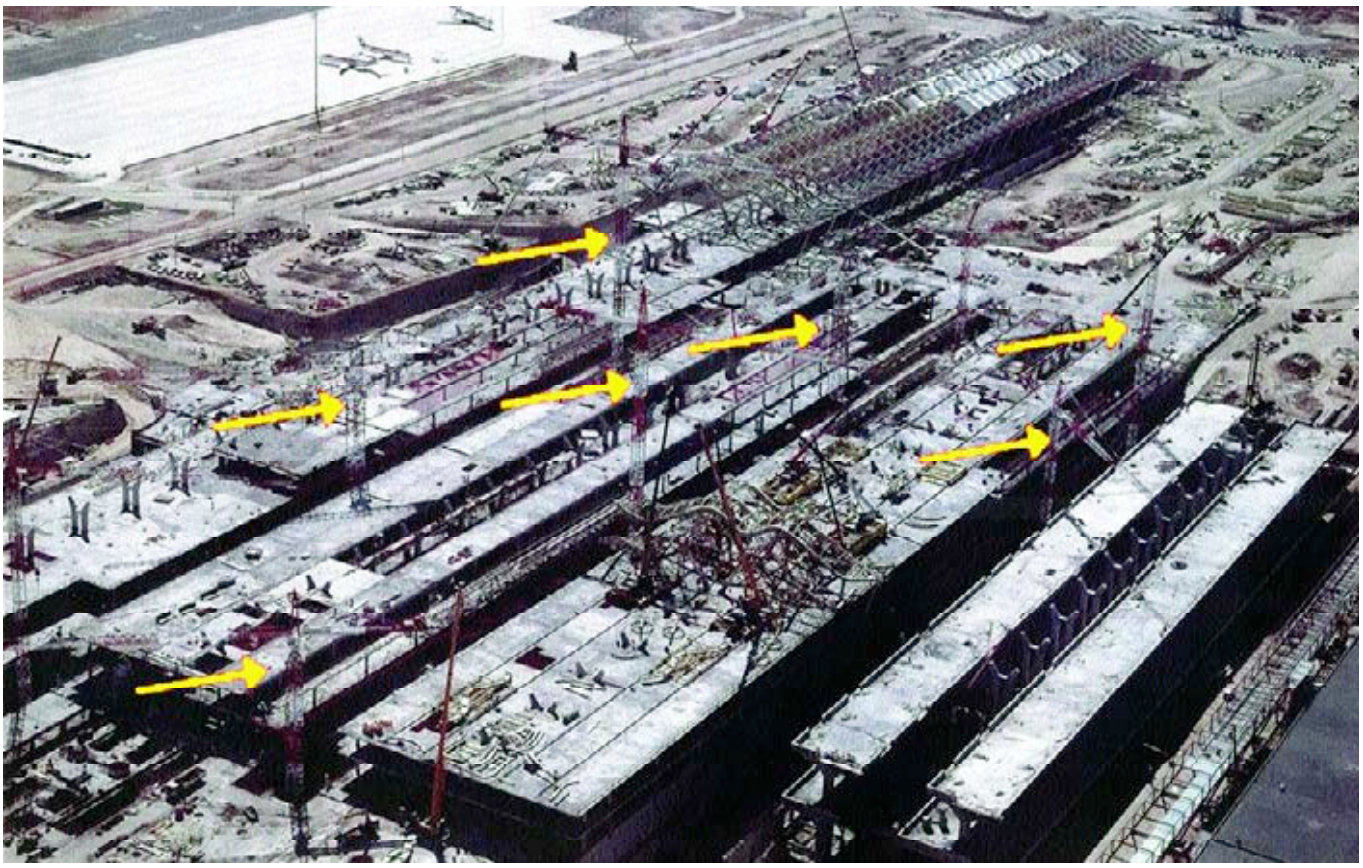


Figura 26. Montaje de estructura en obra: grúas torre previstas.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 27. Montaje de parejas de dintel.

tos, pues el pórtico era sólo estable cuando estaba cerrado y era necesario montar los dos dinteles que apoyan en el mismo pilar en V, o en Y (ver Figura 27).

No obstante, una vez enfocada la construcción en el sentido señalado, necesidades funcionales de AENA hicieron variar ese planteamiento inicial, impidiendo el montaje previsto. Ello obligó a definir otro sistema constructivo que fue el que se llevó a cabo [4].

Para el dique, en la zona que tiene acceso desde tierra por ambos lados, no había problema: se podía montar la estructura con grúas automóviles actuando desde tierra. Para las zonas (casi toda la obra) en las que no se podía montar desde tierra, la sobrecarga admisible de los forjados de hormigón hacía inviable que grandes grúas se desplazasen por los mismos.

La estructura de hormigón tenía unos pilares con luces de 18 metros en el sentido perpendicular a los pórticos metálicos de cubierta. Uniendo estos pilares se situaba una viga de hormigón pretensado, que recogía el forjado de placa alveolar de 9 metros de luz perpendicular a ella [5]. La viga no tenía suficiente capacidad a flexión como para soportar las grúas, pero sí suficiente capacidad a cortante. Por ello se construyeron unas plataformas móviles (Figura 29) sobre las que se montarían las grúas. En situación de trabajo, estas plataformas (marcadas 2 en Fig. 28) se apoyaban en la viga de hormigón en zona próxima a pilares.

El material que provenía de la zona de acopios de la obra se subía al forjado con grúas automóviles y, como se observa en la Figura 28 (marcado con 1), se llevaba a la zona de montaje, donde las grúas principales, situadas sobre las plataformas móviles que se habían situado sobre las plataformas (Figura 29), montaban los elementos principales, pórticos y pilares (Figura 30). Entre los dos talleres que montaron la estructura hubo pequeñas variaciones en el montaje, aunque manteniendo la filosofía común descrita.

Evidentemente, el sistema que se adoptó sólo es admisible en una obra de gran envergadura, por la repercusión económica de todas las estructuras auxiliares y el menor rendimiento respecto a un montaje convencional.

4. FACHADAS TENSADAS

A lo largo de los pórticos, casi en sus extremos, se sitúa la fachada tensada, cuyo motivo arquitectónico era el de la transparencia. Esta transparencia, como se observa en las fotos

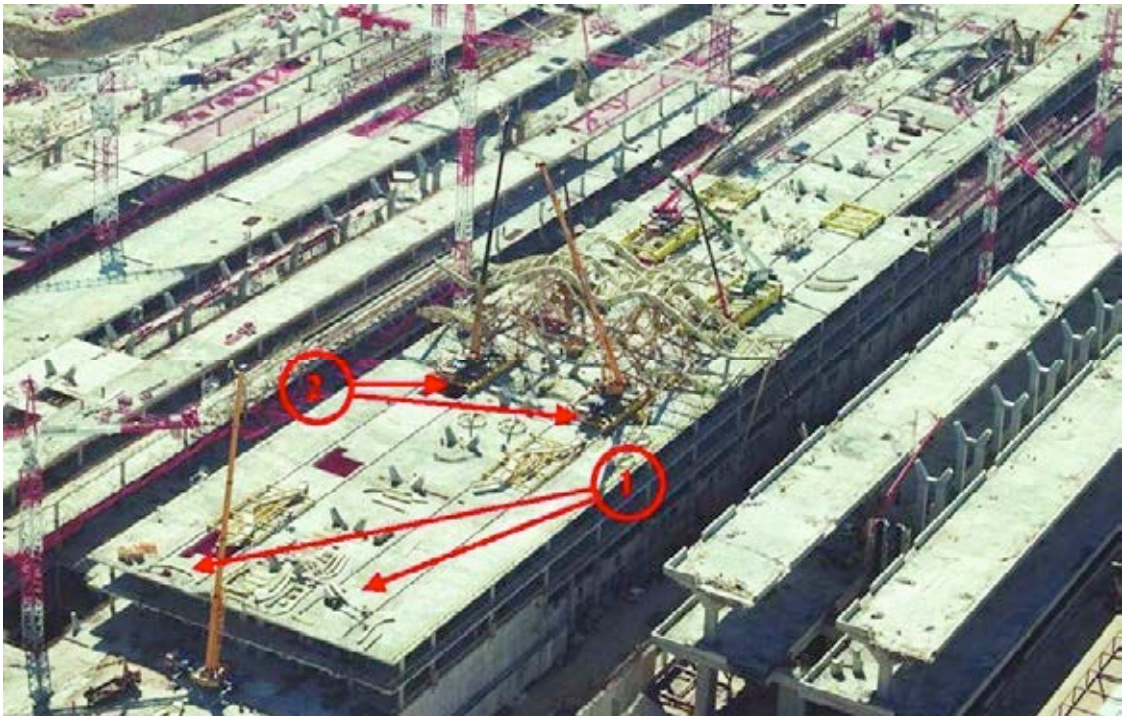


Figura 28. Esquema de montaje sobre forjado.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 29. Situación de las grúas sobre forjados.

Figura 30. Grúas y plataformas de montaje.

adjuntas (Figura 31), se obtiene colocando el vidrio en un sistema estructural que quede lo menos visible posible, lo que se consigue, en este caso, con unas tensoestructuras.

La definición de la fachada es la que se observa en el croquis de la Figura 32.

La fachada tiene una altura variable, cercana a 15 metros, y se sitúa en la mayoría de las fachadas laterales de los edificios (en los testeros se colocó otra tipología, no tensada). En [6] se definen diversas tipologías de muros cortina empleados en el Edificio Satélite, de diseño análogo a este Edificio Terminal.

Se compone de una tensoestructura, que es el elemento resistente principal, separado 9 metros, al igual que los pórticos, que se ancla en su extremo superior en el pórtico metálico y en su extremo inferior en la

Figura 31. Vistas de la fachada tensada.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

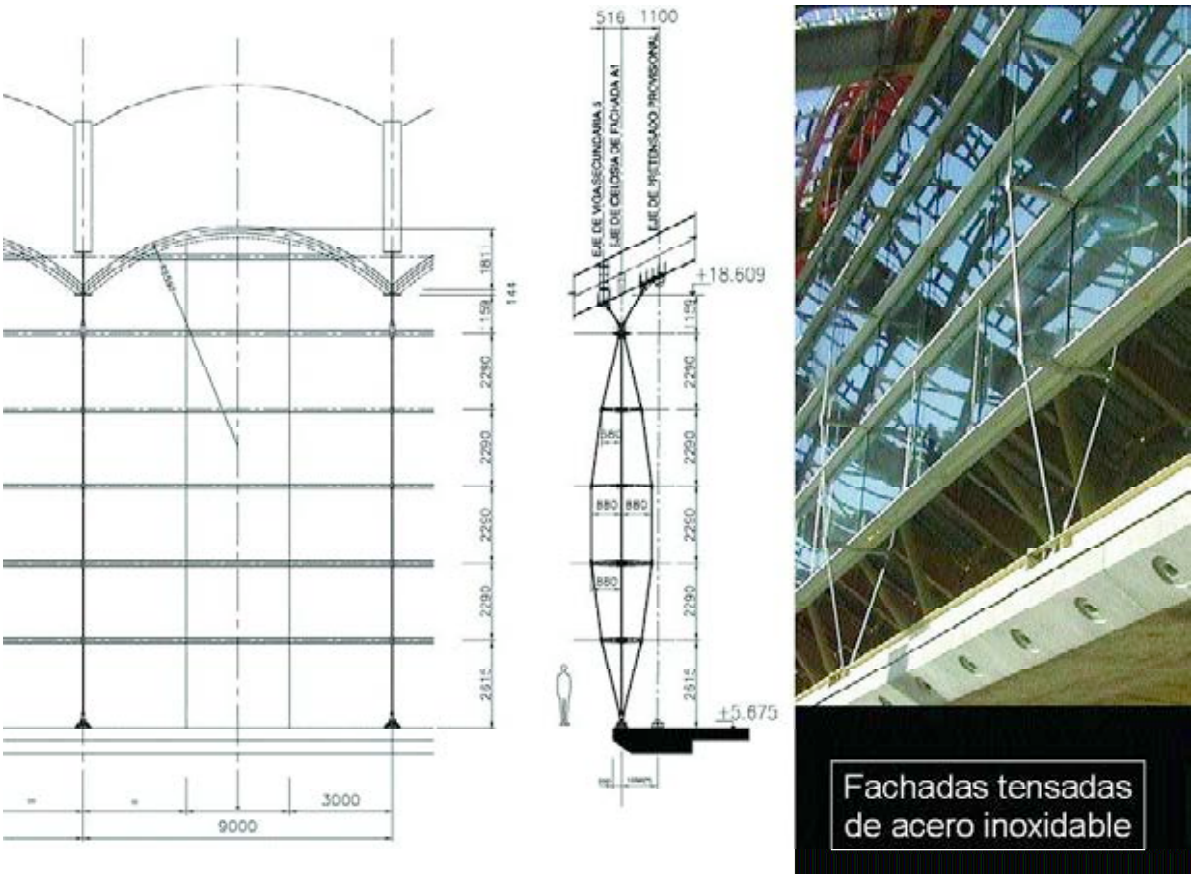


Figura 32. Definición de fachada.

estructura de hormigón. Entre los elementos verticales, se sitúan bandejas horizontales con separación del orden de 2'25 metros. Sobre estas bandejas, que están soportadas por dos tirantes intermedios anclados en la estructura metálica de cubierta, se sitúan los vidrios. En el plano de la fachada, la línea que se observa en la Figura 32 es el plano de vidrios.

La fachada forma módulos coincidentes con las juntas de dilatación, cada 72 metros, que se resuelven sin duplicar los elementos.

La tensoestructura, o elemento resistente vertical (marcados 1, en Figuras 33 y 34), está formada por dos barras de acero inoxidable (tirantes) de 36 mm de diámetro, con la forma que se muestra en las fotos y croquis, y era conocida durante su diseño, como "kipper truss", por su forma de pez (kipper: arenque). Estos tirantes extremos tienen unos montantes entre ellos en los puntos de quiebro (marcados 2 en Figuras 33 y 34), también resueltos en acero inoxidable, esta vez moldeado. La separación máxima de los tirantes en la parte central es de 1'76 metros.

Contra lo que es habitual, este esquema estructural no tiene elemento vertical central resistente que recoja las compresiones producidas por las cargas horizontales sobre la fachada.

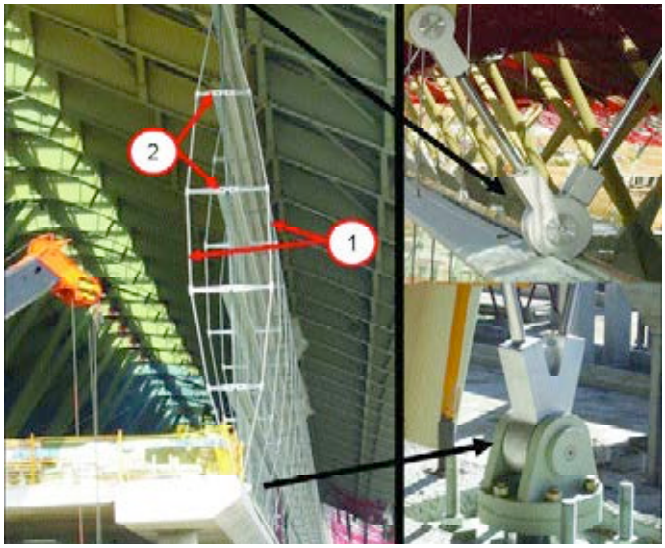


Figura 33. Kipper truss.

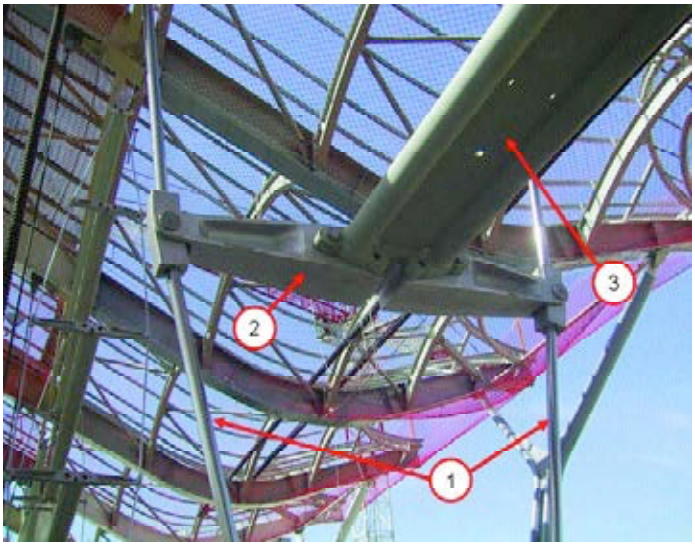


Figura 34. Detalle de montante.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Por ello, la resistencia frente a las cargas horizontales de viento está basada en la forma, para lo que debe estar tesada la pieza, de modo que el tirante que deba resistir las compresiones de los momentos tenga una tracción superior a esa compresión. Las cargas de viento se transmiten por los cuatro elementos horizontales, que es donde acometen las bandejas horizontales que soportan los vidrios. La forma del "kipper truss" hace que frente a carga horizontal simétrica la tensión en los tirantes sea constante, tomando el cortante de estas cargas por la forma de los tirantes. Cuando la carga no es simétrica se produce un cambio de forma. Por lo anterior, el cálculo estructural de este elemento se efectuó considerando comportamiento no lineal. El nivel de pretensado se escoge de modo que bajo la máxima carga muerta en cubierta, nieve, carga de viento y efectos térmicos, acciones todas que destesan los tirantes del kipper, quede un remanente de tracción para recoger la acción del viento.

Dados los grandes movimientos que este funcionamiento estructural produce, las uniones entre elementos (uniones entre tirantes y uniones con montantes horizontales) son rótulas verdaderas con todos sus elementos (bulones, etc.) en acero inoxidable.

La calidad de los aceros inoxidables utilizados es: para los montantes, acero moldeado AISI 316; en los tirantes, acero duplex 1.4462 con un límite elástico de 800 N/mm^2 y una tensión de rotura de 1.000 N/mm^2; en los elementos forjados, acero duplex 1.4462 con un límite elástico de 460 N/mm^2; y los bulones proceden del mecanizado de acero martensítico 1.4057 con un límite elástico de 600 N/mm^2.

Las bandejas horizontales, que también se observan en la Figura 34, consistentes en dos tubos a modo de alas y una chapa a modo de alma, se construyeron en acero estructural S355 recubierto, a efectos estéticos, de una chapa de aluminio. Todos estos materiales (acero inoxidable - acero estructural – aluminio), se aislaron entre sí para evitar corrosiones galvánicas entre ellos por contacto.

Figura 35. Elementos de tesado, por módulos.

Sobre estas bandejas se situaban los vidrios. Dados los grandes movimientos que se producen en la estructura y en la propia fachada, las juntas de vidrios fueron diseñadas de modo que permitiesen estos movimientos sin peligro para los vidrios.

5. MONTAJE DE FACHADAS TENSADAS

El sistema de montaje de esta fachada consiste en montar módulos completos entre juntas de dilatación de la estructura de cubierta.

La dificultad del montaje proviene de varios factores:

- La necesidad arquitectónica de que el plano de fachada de vidrio quede correctamente alineado a lo largo de más de 1 km. Esto dependía de que las contraflechas, sobre todo las horizontales, de la estructura hubiesen sido correctamente calculadas y ejecutadas en la fabricación y, evidentemente, de la calidad de ejecución de la fachada.

- La necesidad resistente de efectuar correctamente el tesado del elemento vertical. Este aspecto se resolvió tesando previamente el pórtico de la estructura contra el forjado, antes de colocar este elemento, para después transferir la carga del tesado provisional al elemento [7]. No obstante, todo ese pretensado no se transferirá al elemento de fachada: la carga muerta todavía no colocada en cubierta, la propia rigidez del pórtico y el alargamiento elástico de las barras de este elemento, harán que solo una parte del pretensado se transfiera a la fachada.

Previamente a la colocación de los "kipper truss" por módulos completos de 72 metros entre juntas de dilatación, se colocaba el sistema de barras de tesado que unían los pórticos de cubierta y los forjados de hormigón en puntos muy próximos (a 1'1 metros), a los que se anclará el "kipper truss" (Figura 35). Este sistema de barras, se tesa mediante unos gatos huecos, a una tensión cuyo valor (dependía del pórtico en cuestión) alcanzaba hasta 70 toneladas por alineación, en el caso de fachada por ambos lados. De esta forma se precarga el pórtico de cubierta.

Paralelamente, en el suelo (Figura 36), y auxiliados por una estructura provisional, se monta el "kipper truss", de modo que se le de un "templado" a sus barras. Se montan así en su posición (Figura 37), conectándolos mediante uniones atornilladas, tanto al pórtico como al forjado de hormigón, y se montan las bandejas horizontales que evitarán que se gire la tensoestructura durante el proceso de transmisión del tesado.

Montados todos los "kipper truss" y las bandejas horizontales que les unen, se efectúa la transferencia de carga a los mismos, soltando el pretensado provisional (Figura 38). Como ya se comentó, dada la interacción con la estructura de cubierta y el alargamiento elástico de las barras del propio "kipper truss", no toda la carga pasa al mismo; de esas 70 toneladas en algunos kipper, con las que se tesaron los elementos provisionales, queda en esta fase el "kipper truss" tesado a unas 50 toneladas.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 36. Estructura provisional de montaje.

Figura 37. Montaje de kipper

Figura 38. Tesado de módulo.

Dado que esta operación se efectúa cuando no está toda la carga permanente colocada, fundamentalmente la de la cobertura, al colocar esta carga el "kipper truss" todavía pierde más tensión, quedando al final (en el caso de los kipper con máxima tensión) un tesado útil del orden de 40 toneladas, mínimo necesario para resistir las fuerzas de viento.

Las deformaciones son muy importantes, resumiéndose en el siguiente croquis (Figura 39) la secuencia de tesado:

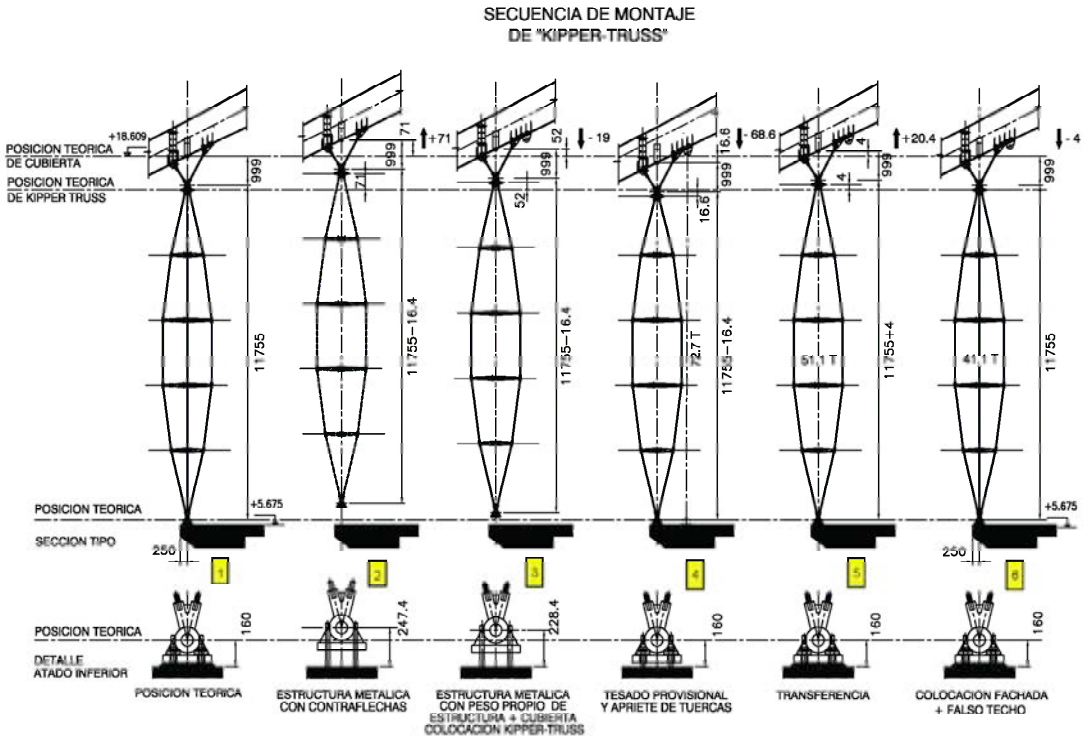


Figura 39. Secuencia de montaje de kipper truss.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Se detallan en el anterior croquis, para un caso tipo, tanto las deformaciones como la fuerza de tesado (72'7 t) y el tesado remanente una vez realizada la transferencia (41'1 t). La fase marcada como 3, es la correspondiente a la colocación del kipper (la marcada como 2, es una fase teórica, en la que está considerada la contraflecha pero no se han introducido las cargas), la fase como marcada 4, la correspondiente al tesado, y la fase 5 la de la transferencia, antes de colocar el peso de fachada y falso techo.

Esta secuencia descrita es la elegida para módulo aislado, para lo que se contaba con dos juegos completos de gatos, cada uno trabajando en las dos alineaciones extremas del mismo conjunto de pórticos.

Así, en las zonas del Dique en la que los módulos son simétricos, con fachadas a ambos lados de los pórticos, se tesan simultáneamente las dos fachadas de los mismos pórticos del módulo. No obstante, a lo largo del Dique existen 17 módulos que, aunque separados por juntas de dilatación, están realmente conectados frente a los movimientos relativos verticales y en algunos casos, en la parte central del edificio, conectados frente a los movimientos relativos verticales entre un pórtico y el contiguo de otro edificio. Asimismo, hay zonas que sólo tienen fachada por un solo lado (las contiguas al procesador). Todo lo anterior hace que cada pretensado realizado en un módulo quede afectado por el pretensado del módulo contiguo, para lo que fue necesario establecer un cálculo longitudinal completo y la correspondiente secuencia de tesados. El control se efectuó tanto por carga en los gatos de tesado como por deformaciones, midiendo la separación entre forjado y tensoestructura.

6. CONCLUSIÓN

Se ha intentado explicar en el presente artículo la definición de proyecto y la construcción de una estructura más compleja de lo que, en principio, parecía, fundamentalmente debido a su gran deformabilidad, más allá de su clara importancia económica y la necesaria calidad estética tanto de la propia estructura como, sobre todo, de sus fachadas. Los autores de este artículo agradecen a la UTE, compuesta por las empresas más importantes del sector, que confiaran el proyecto y, junto a los técnicos de la obra, la definición de los sistemas constructivos descritos a un equipo, el Servicio de Obras Especiales de una de las empresas de la UTE, FCC Construcción.

En una obra tan singular es necesaria la confianza mutua entre todas las personas que participan en su diseño y construcción, lo que claramente sucedió en esta obra. Decenas de personas han tenido una participación fundamental en este proceso: en particular, además de la colaboración con los equipos de los Arquitectos Lamela y Rogers, queremos señalar el apoyo del Director de la obra, Jesús Mendiluce, ingeniero aeronáutico, y del Gerente de la UTE, Francisco Asensio, ingeniero de caminos, impulsor de todo el proceso. La estructura metálica fue fabricada y montada por los talleres Horta y Emesa y las fachadas por Folcrá.

REFERENCIAS

[1] Hesse Martín, José Manuel: "Planteamiento aeroportuario de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Lamela, Carlos; Moya, Paz: "Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Hontoria Asenjo, Alberto: "Sistema de Calidad y su aplicación en la ejecución de la estructura del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] Gómez Hermoso, Jesús; Gutiérrez Bueno, Manuel; Moreno Puertollano, Antonio: "Nuevo Edificio Terminal. Singularidades, incidencias y soluciones en la ejecución de la obra". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[5] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: "Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[6] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: "Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[7] Peña Pascual, José Manuel: "Tesado multipunto de la fachada del Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Relación entre el proyecto, la ingeniería de detalle de construcción y la ejecución del nuevo Edificio Terminal

Project, engineering construction detail and work relationship in new Terminal Building

Jesús Gómez Hermoso
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FCC Construcción, S.A.
Jefe Oficina Técnica de Terminal Barajas UTE
(ACS, FCC, Ferrovial-Agromán, NECSO, SACYR)

RESUMEN

En este artículo, tras una breve descripción del edificio, se desarrolla el sistema de trabajo de la Ingeniería de Detalle de Construcción (IDC) llevado a cabo por la Oficina Técnica del Constructor en Obra (OTCO), indicando sus objetivos, funciones, organización interna y procedimiento de trabajo para el proyecto y el seguimiento de la obra.

Se realiza una revisión del análisis del proyecto licitado y se describen los elementos modificados, y sus razones, en la cimentación, esquema estructural (con análisis de diversas alternativas), procedimiento constructivo, vigas postesadas, vigas de borde, juntas de dilatación, forjado y pilares de la estructura de hormigón.

Finalmente, se describen brevemente la estructura metálica de cubierta, los muros-cortina de la fachada, las estructuras metálicas interiores y prepasarelas, así como las instalaciones y los transportes mecánicos.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, estructura, hormigón, acero, edificación, proyecto.

SUMMARY

This paper, after a short building description, explains the Construction Detail Engineering work system made for the Constructor Technical Office, with its targets, functions, internal organization and work method for the project and the construction assistance.

It makes a revision of the bid project analysis and describes the modified elements, and their reasons, in foundation, structural scheme (with analysis of several alternatives), work proceedings, post-stressed beams, border beams, movement joints, slab and columns of concrete structure.

At last, a short description is included of the roof steel structure, curtain-wall, interior steel structures and prefingers, as well as mechanics and mechanical transports.

Key words: *Airport, Barajas, structure, concrete, steel, building, project.*

1. INTRODUCCIÓN

El Nuevo Edificio Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas fue proyectado durante los años 1998 y 1999. Cuando la Propiedad (AENA) convocó el concurso para la realización de esta obra, realizó un planteamiento poco habitual: al presentar su oferta cada uno de los candidatos a adjudicatarios de la obra, debía mantener una cifra económica para el desarrollo de la Ingeniería de Detalle de Construcción (IDC). El adjudicatario debía crear una Oficina Técnica del Constructor en Obra (OTCO) para su desarrollo.

El Proyecto Constructivo que se licitó se encontraba definido hasta un cierto nivel. Sin embargo, ya entonces se preveía la necesidad de ampliar la información contenida en el mismo para poder desarrollar la obra. Posteriormente, a lo largo de la misma, se ha podido confirmar que esa necesidad detectada

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

por la Propiedad estaba justificada. De los 2.300 planos iniciales se ha pasado a un total de 25.900 (considerando la revisiones realizadas que más tarde se comentarán), finalizando con 12.400 planos válidos para la construcción. Esto ha supuesto que la IDC en numerosas unidades se ha convertido en un auténtico Proyecto Constructivo, sin reducirse a la definición de los detalles y de los procesos constructivos.

El sistema implantado supone la participación de numerosos especialistas por parte de los diversos agentes que han intervenido en el proceso, ya que tanto la Propiedad con sus equipos directamente colaboradores, como el Aeropuerto, los Estudios responsables del diseño arquitectónico, las Ingenierías que supervisaban la IDC de estructuras e instalaciones, o su ejecución en obra y, lógicamente, Terminal Barajas UTE como empresa constructora, disponían de numerosos técnicos en las múltiples disciplinas que se encuentran comprendidas en la obra. La relación entre todos ellos y, sobre todo, la sistematización del desarrollo de la IDC, su revisión, su aprobación, su ejecución y su control es, por sí misma, una auténtica labor ingenieril.

A lo largo de este artículo se describirá tanto el proceso seguido en el desarrollo de la IDC, como el proyecto y sus alternativas de algunos elementos, sobre todo estructurales. En este último aspecto se incide con el objetivo de obtener el máximo aprendizaje posible de esta experiencia para futuras realizaciones.

2. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

Aunque en otros artículos de los presentados en esta publicación se encuentra una descripción más detallada de la obra, se presenta aquí una más breve que puede ayudar al lector que no considere necesario profundizar más en aquélla.

2.1. Arquitectura

El Nuevo Edificio Terminal (NET) está compuesto por tres volúmenes paralelos, orientados en el sentido Sur-Norte, con tres plantas sobre el nivel de rasante de la plataforma (Figura 1). Bajo este nivel los tres volúmenes se unen en el –1, reduciéndose su superficie según se desciende hasta el nivel –3. Los citados tres volúmenes principales se encuentran separados por los cañones, que son espacios vacíos en toda su altura (sobre la rasante de plataforma).

El Facturador es el primero de los volúmenes (tanto en el sentido Oeste-Este, como en el de acceso al edificio), con 350 m de longitud y 57 m de anchura. Está previsto para 174 mostradores de facturación de equipajes. El segundo volumen, el Procesador, tiene las mismas dimensiones en planta, con una previsión de 18 puestos de control de seguridad para pasajeros. En el Dique, tercero de los volúmenes del edificio, con una longitud de 1.142 m y una anchura de 39 m, se disponen las salas de embarque de acceso a las aeronaves.

Del mismo y en número de treinta y siete, parten las prepasarelas que permiten a los pasajeros la conexión entre el edificio y la plataforma y aeronaves.

La superficie total construida de los tres volúmenes es de 470.000 m^2, de los que 228.000 m^2 se encuentran sobre el nivel de plataforma y 242.000 m^2 bajo la misma.

La cubierta, con una superficie superior a los 150.000 m^2, es común a los tres volúmenes y se extiende en planta fuera de los límites de la fachada, formando unos aleros que la protegen, parcialmente, de la incidencia del sol.

La fachada, totalmente acristalada y constituida por un sistema de muro-cortina entre el nivel +1 y la cubierta, tiene una

Figura 1.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

superficie que supera los 40.000 m^2, con una longitud total de 2.890 m a lo largo del perímetro de edificio.

A los citados tres volúmenes es preciso añadir, para completar la descripción arquitectónica, la Dársena, zona que recoge el acceso desde el exterior del área aeroportuaria, tanto mediante vehículos automóviles como ferroviario (Metropolitano y RENFE), y que se encuentra bajo una cubierta con la misma tipología que el resto del edificio.

Entre los cuatro volúmenes resultantes se encuentran los tres cañones que crean los espacios vacíos entre aquéllos y que acogen los puentes que los comunican en los niveles 0, +1 y +2.

El edificio tiene siete accesos rodados a las plantas sótano -1 y -2. Tres permiten el acceso a los niveles -1 y -2 del Facturador, dos al nivel -1 del Procesador y dos al nivel -1 del Dique.

Un mayor detalle en la descripción del planteamiento aeroportuario y arquitectónico se encuentra, respectivamente, en [7] y [8].

2.2. Transportes mecánicos

El movimiento de personas a través del edificio, tanto entre distintos niveles como a lo largo del nivel +1 del Dique, se realiza a pie o mediante cuatro tipos de transportes mecánicos: ascensores (montacargas y panorámicos), rampas mecánicas, pasillos rodantes y escaleras mecánicas.

En el Cañón I, situado entre la Dársena y el Facturador se produce el acceso y salida del edificio y la comunicación vertical entre las estaciones de RENFE y Metropolitano (situadas en el nivel -1) con el resto de los niveles. Esta se produce mediante rampas mecánicas, ascensores panorámicos y escaleras. Las primeras, con longitudes de hasta 35,60 m apoyan en sus extremos en los puentes metálicos que comunican ambos núcleos del edificio.

En el Cañón III, entre el Procesador y el Dique, se encuentra el acceso hacia y desde la estación del APM. La comunicación vertical se realiza mediante escaleras mecánicas fijas y ascensores panorámicos, alcanzando éstos desarrollos de hasta 15,50 m.

En el Dique, para facilitar un más rápido traslado a lo largo de sus más de 1100 m de longitud, se ubican 6 pasillos rodantes dobles con longitudes entre 59,40 y 68,40 m.

2.3. Automatic People Mover (APM)

Los principales edificios de la Nueva Área Terminal (NAT) son el Nuevo Edificio Terminal (NET) y el Edificio Satélite, situado al Este de la pista de vuelo 18R/36L. Éste se comunica con el primero a través del Túnel de Servicios Aeroportuarios (TSA), que tiene una longitud de 2.100 m.

A través de dicho túnel discurre el APM. Este transporte está formado por vehículos sencillos o combinados formando trenes que se desplazan totalmente automatizados por un camino guiado, sin conductor a bordo, siendo los intervalos de paso de entre 60 y 120 segundos.

2.4. Sistema Automático de Tratamiento de Equipaje (SATE)

El Sistema Automatizado de Tratamiento de Equipajes (SATE) es el conjunto de subsistemas, equipos, componentes y sistemas de control necesarios para identificar, inspeccionar, transportar, clasificar, distribuir y/o almacenar el equipaje que se introduce en cualquiera de los puntos de entrada del área terminal (facturación, posiciones de estacionamiento de avión), de una forma rápida y eficaz.

En todas las plantas del edificio se encuentran zonas destinadas a este sistema, comenzando por el Nivel +2 de Facturador, donde desde los mostradores de facturación comienza el trazado del sistema para las entradas de equipajes en la Terminal. A través de los niveles +1 y 0 se produce la comunicación con los inferiores a la cota 0. En el nivel –1, en las alas Norte y Sur del Dique, se produce el tratamiento de los citados equipajes, así como en el nivel –2 del Facturador y Procesador. La comunicación con el Edificio Satélite se lleva a cabo a través del TSA.

3. PLANTEAMIENTO DE LA IDC

La Ingeniería de Detalle de Construcción se planteó, por parte de la Propiedad, como un sistema que permitiera completar los elementos del Proyecto de Construcción que no estuvieran totalmente desarrollados. En la práctica, sin embargo, en muchas unidades de la obra se tradujo en la realización del Proyecto de Construcción con el que se construye el edificio. En cualquier caso, lo que siempre ha sido fundamental es el respeto de las líneas generales del proyecto, tanto a nivel formal como de calidad y definiciones básicas. Ha sido el desarrollo ingenieril el que ha dado lugar a las nuevas definiciones.

La Propiedad disponía de un equipo técnico propio, así como de otro conjunto formado por seis equipos pertenecientes a importantes empresas de ingeniería y arquitectura, que supervisaban el desarrollo de la IDC y de la ejecución de la obra, tanto en calidad como en plazo. Igualmente disponía de equipos de especialistas en temas muy específicos (geotecnia, climatización, …) que, de forma puntual, intervenían en el proceso.

El Aeropuerto, a través de sus gestores y técnicos, también ha participado en la supervisión del Proyecto durante la ejecución de la obra, dejando de manifiesto sus necesidades y mejores criterios para el diseño de algunos elementos.

4. OFICINA TÉCNICA DEL CONSTRUCTOR EN OBRA (OTCO)

4.1. Objetivo

El objeto de la Oficina Técnica del Constructor en Obra (OTCO) es, fundamentalmente, el desarrollo de la Ingeniería

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

de Detalle de Construcción (IDC) que permita la completa definición de todos los elementos que han de ejecutarse durante el desarrollo de la obra.

4.2. Funciones

Las funciones de la OTCO para cumplir con aquello que es su objeto son las siguientes:

- Revisión del Proyecto de construcción.
- Estudio de soluciones alternativas al Proyecto de construcción.
- Desarrollo de Propuestas de cambio.
- Desarrollo de la documentación (memorias, anejos, planos y mediciones) que constituye la Ingeniería de Detalle de Construcción que es su objeto fundamental.
- Seguimiento de las IDCs durante la ejecución de la obra (modificaciones, correcciones y estudio de "no conformidades").
- Seguimiento de la ejecución de la obra y asistencia técnica a las incidencias producidas en la misma.
- Desarrollo del Proyecto "as built".

4.3. Organización interna

La organización de la OTCO se basa en su actuación en tres departamentos que responden a los tres campos fundamentales de arquitectura, obra civil (cimentación y estructura) e instalaciones, que constituyen el proyecto de un edificio, completándose con las secciones de delineación, materiales y reprografía, contando también con secretaría y archivo, y un coordinador que realiza, entre otras funciones, el seguimiento de la programación prevista. Dicha organización se recoge en la Figura 2.

Este equipo técnico contaba, en su momento de máxima extensión, con 39 personas como integrantes de la OTCO, 6 equipos de ingeniería externos a la misma para el proyecto de la estructura y 4 equipos para el proyecto de las instalaciones.

4.4. Desarrollo de la Ingeniería de Detalle de Construcción

El objeto fundamental de la O.T.C.O. es el desarrollo de la Ingeniería de Detalle de Construcción (I.D.C.). Ésta se lleva a cabo partiendo del Proyecto de Construcción que sirvió de base para la licitación de la obra.

La Ingeniería de Detalle de Construcción de toda la obra se articula sobre un conjunto de documentos, denominados "IDC", en los que se ha ordenado el Proyecto de Ejecución.

Las fases que se han de seguir para el desarrollo hasta su aprobación final de cada una de las IDCs son las siguientes:

1. Revisión del Proyecto de construcción.
2. Definición de criterios para el desarrollo de la IDC. Serán fijados por la Dirección de Obra, normalmente tras el asesoramiento de sus equipos. En los casos en que se considere más operativo, serán propuestos por la OTCO, debiendo ser confirmados por la citada Dirección de Obra.
3. Obtención de los datos necesarios para el buen desarrollo de la IDC. Estos datos tendrán su origen en el Proyecto de Construcción, en propuestas realizadas por la OTCO o en modificaciones o complementos del mencionado proyecto llevadas a cabo por la Dirección de Obra.
4. En el caso de que la IDC la desarrolle un colaborador externo a la propia OTCO, facilitar los datos al mismo.

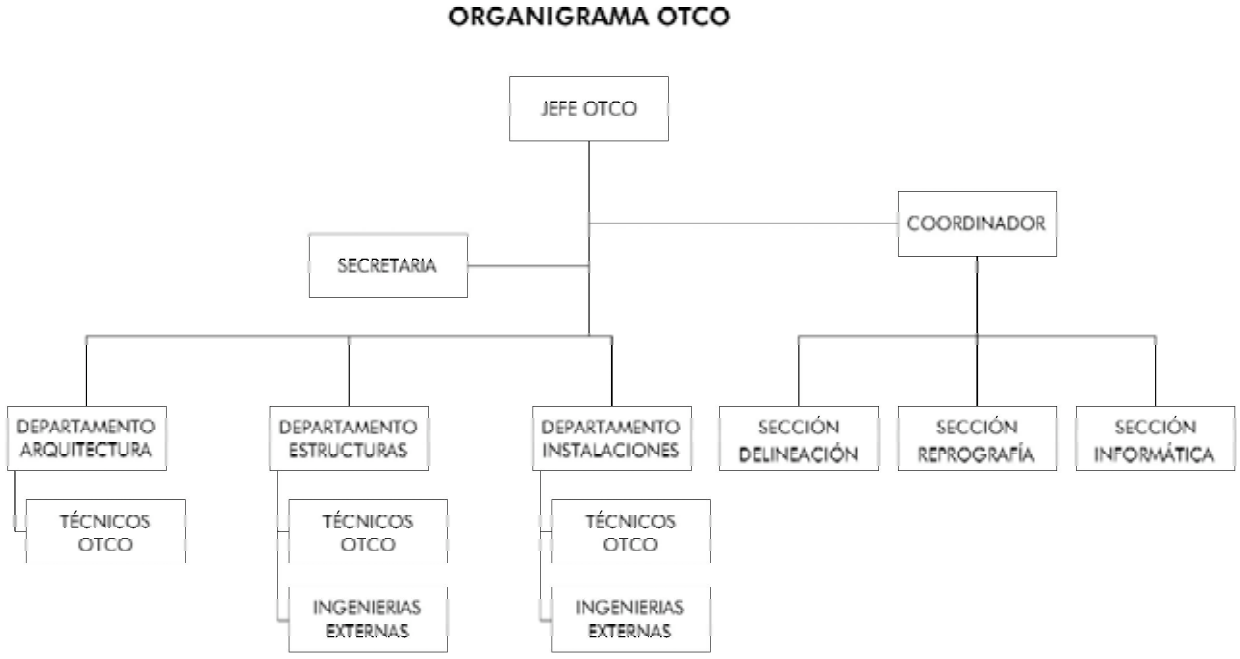


Figura 2.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Éste también colaborará en las fases de revisión del Proyecto de construcción y fijación de criterios si así se estima oportuno.

5. Recepción de la IDC realizada por el colaborador o desarrollo de la misma por parte de la propia OTCO.

6. Revisión de la IDC, sobre todo en el caso de haber sido desarrollada por colaborador externo, por parte de la OTCO, tanto del Departamento directamente afectado como por los otros.

7. Si se detectan errores, se devolverá al colaborador, quien tras realizar las correcciones oportunas enviará de nuevo el documento a la OTCO.

8. Este documento ya corregido (o el anteriormente recibido, si no hubo errores), se enviará a la Dirección de Obra para que, a través de sus equipos asesores y de ella misma, emita los correspondientes informes que permitan comunicar a la OTCO las observaciones que estime oportunas.

9. Una vez recibidos todos los informes de la Dirección de Obra, se realizará un compendio de las observaciones presentadas, que se incorporarán a las planteadas por la propia OTCO. Todas ellas se incorporarán a la relación general que se incluye en el impreso de revisión de la IDC correspondiente. Analizados los puntos correspondientes, se definirán aquéllos que han de ser objeto de corrección en la IDC original.

10. Con las conclusiones del punto anterior se realizará la revisión 1 (r1) de la IDC correspondiente, ya sea por parte del equipo colaborador si es el autor de la versión original o por la propia OTCO, si ha sido ésta la autora.

11. Envío de la revisión 1 de la IDC (IDCr1) a la Dirección de Obra.

12. Estudio del documento por los equipos asesores de la Dirección de Obra y por esta misma, con la emisión de los informes oportunos. En esta fase, en los citados informes únicamente deben figurar errores importantes detectados y no aquellos de menor importancia que sólo tengan por objeto realizar ligeras mejoras de la IDC.

13. Si la IDC ha de ser revisada por contener errores o necesitar cambios importantes, siguiendo el mismo procedimiento establecido para la fase anterior se desarrollará la revisión 2 (IDCr2). Si no es así, será aprobada por la Dirección de Obra.

Este proceso se expresa gráficamente en la Figura 3.

PROCESO DE DESARROLLO DE INGENIERÍA DETALLE DE CONSTRUCCIÓN

Figura 3.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

4.5. Seguimiento de la obra

Tras la aprobación de cada IDC se abre un proceso de seguimiento de la misma en obra. A lo largo de éste los documentos que han servido de base a la IDC, principalmente los planos, sufrirán una serie de cambios. Éstos pueden ser ocasionados por modificaciones solicitadas por la Dirección de Obra o sus equipos de asesores y aprobados por ésta, cambios solicitados por el Constructor, errores detectados en la IDC o que se produzcan en la obra durante su ejecución, o adaptaciones a circunstancias no conocidas con anterioridad (elementos arqueológicos, servicios no detectados, requerimientos de instancias exteriores a la obra ya sean municipales, autonómicas, aeroportuarias, ...).

Tras la firma de la IDC por parte de la Dirección de obra se comienza el proceso con el establecimiento de una relación de modificaciones a la misma que se encuentran pendientes, y que se recogerán en el impreso correspondiente. Esta relación se irá incrementando a lo largo de la obra con todos aquellos aspectos que surjan de algunas de las fuentes enumeradas en el párrafo anterior.

Las modificaciones se pueden traducir en una nota aclaratoria de algún aspecto recogido en la IDC, en croquis, en planos, o pueden llegar a constituir una adenda a la IDC aprobada que genere una documentación similar a aquélla.

El responsable de la IDC será la persona que seguirá todas las modificaciones de la misma durante la obra. Actualizará el cuadro mencionado y llevará a cabo los cambios de los documentos que constituyen la citada IDC. Este trabajo lo llevará a cabo con los colaboradores exteriores a la OTCO que participaron en su redacción o bien preparando la documentación directamente en esta última.

Durante el seguimiento de la obra es posible que se produzcan "no conformidades" que lleven a la OTCO a desarrollar documentos técnicos que expliquen la actuación correspondiente. Esta labor se encontrará coordinada con el Departamento de Calidad de la UTE y con el Equipo de Gestión de Control de la Obra (EGCO), colaborador directo de la Dirección de Obra. En [9] se desarrolla con detalle el trabajo realizado por aquél.

4.6. Seguimiento del proyecto durante la ejecución de la obra

Tras la aprobación y firma de las IDCs por parte de la Dirección de Obra, se realiza el seguimiento de las mismas durante la ejecución. Dicha actividad puede generar, básicamente, dos tipos de documentos: Incidencias de obra (IDO) y Actuaciones tras aprobación (ATA).

Las ATAs tienen un tratamiento similar a las IDCs en todo su proceso de presentación, aprobación y firma. Su contenido puede ser de tres tipos: croquis, plano o adenda. Esta última se preparará cuando sean necesarios cálculos adicionales o la preparación de algún estudio específico, o bien un elevado número de planos que modifiquen o complementen a los de las IDCs. Como referencia del volumen de documentación generada debe indicarse que se han desarrollado 901 IDCs y 1.383 ATAs.

Las IDOs tienen como origen una incidencia que se produzca en obra y que sea susceptible de ser tratada mediante documentación técnica. Para su aprobación se realizará una primera presentación a los equipos asesores de la Dirección de Obra en el seguimiento de la ejecución de la misma. Dichos equipos serán los responsables de la validación y presentación a la citada Dirección de obra para la aprobación y firma.

4.7. Proyecto "as built"

El Proyecto "as built" es uno de los objetos de la OTCO. Para su obtención se partirá de los documentos constituyentes de las IDCs, que se completarán con las modificaciones que en las mismas se produzcan a lo largo de la obra.

En la generalidad de la obra, el control de la incorporación al proyecto "as built" se realizará mediante el cuadro de "Relación de modificaciones" establecido en el seguimiento de la misma.

5. DESARROLLO DE LOS TRABAJOS

El desarrollo de los trabajos correspondientes a la IDC y al seguimiento de obra se ha llevado a cabo desde la OTCO, ya fuera, como se ha indicado anteriormente, con sus propios medios o con técnicos externos a la misma. Estos últimos, en la especialidad de "Estructuras" fueron los siguientes:

– Estudio del terreno	Ingeniería del suelo
– Proyecto de estructura de hormigón	FHECOR y PROINA
– Proyecto de estructura metálica de cubierta	Servicio de Obras Especiales de FCC Construcción
– Proyecto de estructura del muro-cortina	Servicio de Obras Especiales de FCC Construcción
– Proyecto de diversas estructuras metálicas	ARQUING, PROINA, y CALTER

El trabajo relacionado más directamente con el proyecto se llevó a cabo, para la mayor parte de la obra civil, desde junio de 2000 a diciembre de 2002. Sin embargo, es necesario subrayar la importancia del primer año, entre junio de 2000 y junio de 2001, fechas en las que se realizó el análisis profundo del Proyecto de Construcción licitado, el estudio de alternativas, los estudios adicionales que se consideraron necesarios, los cálculos y los planos de las principales unidades de obra: cimentación, estructura de hormigón, cubierta metálica y muros-cortina. En la Figura 4 se puede apreciar la distribución de estas actividades a lo largo del tiempo entre junio de 2000 y diciembre de 2001.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

NET PLANIFICACIÓN IDC

	2000							2001											
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Implantación																			
Formación de OCTO																			
Análisis de Proyecto																			
Estudio de alternativas de la estructura de hormigón																			
Desarrollo de la IDC (p. constructivo) de la cimentación																			
Ejecución de la cimentación																			
Desarrollo de la IDC (p. constructivo) de la estructura de hormigón																			
Definición del forjado																			
Desarrollo de la IDC (p. constructivo) del forjado																			
Fabricación y suministro de placas alveolares prefabricadas																			
Estudio de alternativas de la estructura metálica de cubierta																			
Desarrollo de la IDC (p. construc.) estructura metálica de cubierta (M2)																			
Fabricación de la estructura metálica de cubierta																			
Montaje de la estructura metálica de cubierta																			
Estudio de alternativas y desarrollo de IDCs de Arquitectura																			
Estudio de alternativas de Instalaciones																			
Desarrollo de las primeras IDCs (p. constructivo) instalaciones																			

Figura 4.

Para el mejor desarrollo de los trabajos de proyecto, revisión del mismo y ejecución de obra, se dividió el edificio en 30 pastillas. Esta medida permitía avances parciales que llevaban a una agilización del proceso frente a soluciones más globales. Por otra parte, la dimensión de la obra, más de 1 km de longitud permitía, y recomendaba, atacar la misma en varios frentes. Esta medida, que se mostró útil en las unidades de cimentación y estructura, fue modificada en unidades de arquitectura e instalaciones que permitían y exigían otro tipo de distribución no zonal, pero sí por tipologías o por características de los elementos.

6. ANÁLISIS DEL PROYECTO

El análisis del Proyecto de Construcción licitado se desarrolló, para la cimentación y la estructura, durante los meses del verano de 2000. Fue necesario tener también presente los proyectos de arquitectura e instalaciones, ya que la interrelación entre los tres campos siempre es fundamental en el desarrollo global de la obra. Conocer las cargas debidas a la maquinaria de instalaciones o los huecos (ubicación y dimensiones) necesarias para cada una de ellas, en especial la de climatización por los huecos y conductos y la de electricidad por las cargas, así como la definición de las particiones y elementos singulares de arquitectura, es fundamental para enfocar y llevar adelante un buen proyecto de cimentación y estructura.

El análisis llevó a la realización de una serie de propuestas de modificaciones que en algunas ocasiones finalizó con su desarrollo y en otras con su abandono por falta de acuerdo entre los diversos intereses presentes o por imposibilidad de desarrollo en el tiempo. Debe tenerse en cuenta que el plazo, tanto para el proyecto como para la obra, era muy estricto.

En la cimentación se estudiaron aspectos que afectaban a:

- Muros-pantalla y muros encofrados a dos caras.
- Zapata combinadas y zapatas aisladas.
- Pilotes.

En la estructura se han desarrollado elementos relacionados con las siguientes unidades:

- Proceso general con vigas ejecutadas “in situ” o prefabricadas.
- Recubrimiento prefabricado de vigas tipo.
- Recubrimiento prefabricado de vigas de borde.
- Recubrimiento prefabricado de pilares.
- Juntas de dilatación.
- Forjados constituidos por placas alveolares pretensadas prefabricadas.
- Niveles estructurales bajo rasante.
- Estructura metálica de cubierta.
- Estructura de muros-cortina.
- Puentes interiores.
- Plenum de climatización.
- Afección de transportes mecánicos.

El objetivo final ha sido la optimización de la calidad, el coste y el plazo en un compromiso harto difícil de alcanzar en numerosas ocasiones.

7. CIMENTACIÓN

La cimentación comienza siempre con el estudio del terreno, que fue necesario ampliar con respecto al inicialmente existente. Aunque las características resistentes del mismo, con una tensión admisible para zapatas aisladas de 4,00 kp/cm^2 y para

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 5.

zapatas corridas de 3,00 kp/cm^2, eran buenas, existía un nivel de aguas que no se tenía confirmado si eran derivadas de un elevado nivel freático o eran aguas colgadas. Tras la citada ampliación del estudio geotécnico y el estudio hidrológico, se confirmó esta última circunstancia.

Parte de los muros de contención estaban proyectados como muros-pantalla. Sin embargo, teniendo en cuenta las características del terreno y la posibilidad de excavar el trasdós de los citados muros, se optó por una solución de muros encofrados a dos caras, con unas pendientes del terreno excavado entre 1/3 y 1/6. Para evitar los riesgos derivados de un posible deslizamiento de tierras debido a las lluvias, se optó por cubrir los taludes con un geotextil y una malla de triple torsión que se anclaba en la parte superior (Figura 5).

La cimentación de los pilares interiores ha sido directa mediante zapatas aisladas, losas y zapatas corridas. Sin embargo, en la zona central del edificio, bajo el Facturador, el Procesador y parte del Dique se ha realizado una cimentación profunda mediante pilotes de 1.250 mm de diámetro y profundidad variable con longitudes de empotramiento de 5, 7 y 9 m. La razón de esta tipología no se encuentra en unas malas características portantes del terreno natural, sino en un relleno que fue preciso realizar. Por razones derivadas de un distinto planteamiento geométrico anterior, el Túnel de Servicios Aeroportuarios (TSA) tenía comenzada su ejecución en una zona que invadía parcialmente las plantas inferiores del Nuevo Edificio Terminal. Fue preciso demolerlo y rellenar y compactar con tierras el espacio por él ocupado. Como las cargas que transmitían las zapatas sobre esta zona eran elevadas, apoyarlas directamente sobre el relleno pareció una medida arriesgada, que podía dar lugar a unos asientos diferenciales importantes con respecto a las que descansaban directamente sobre terreno natural. Se planteó la altemativa de pozos, pero la ejecución de éstos a través de unos rellenos podía suponer la necesidad de realizar una entibación o bien sufrir posibles desprendimientos de los citados recientes rellenos. Finalmente se optó por pilotar esa zona del edificio, medida que finalmente se mostró muy eficaz. Los pilotes fueron controlados mediante ensayos por los métodos sónico sobre un 80% de los mismos y ultrasónico, más conocido como “crosshole”, sobre un 10%. Sobre éstos se encuentra una información más amplia en [10].

8. ESTRUCTURA DE HORMIGÓN

8.1. Estudio de alternativas

La estructura de hormigón del edificio está formada, en su esquema básico, por pórticos orientados en el sentido N-S constituidos por vigas postesadas de 72 m de longitud divididas en cuatro vanos de 18 m, apoyadas en pilares de sección rectangular (los pórticos centrales de Facturador, Procesador y Dique) y circular (resto de los pórticos). Además de este tipo de pórtico general, existen otros con vanos de 9 m o bien con vigas armadas o postesadas de canto hasta 2,75 m. La separación entre pórticos es de 9 m. El canto de las vigas es de 0,90 m en el nivel 0 e inferiores y 0,80 m en los superiores. El diámetro de los pilares se encuentra entre 1,20 m en la planta inferior y 0,65 m en la superior. El forjado está constituido, básicamente, por placas alveolares pretensadas prefabricadas de 20 cm de canto y una capa de compresión de 10 cm. Más detalles sobre la estructura del edificio se encuentran en [11].

Entre los pilares extremos del Dique existe una distancia de 1.142 m, y el esquema de la estructura es aparentemente muy repetitivo. Estas dos circunstancias hicieron pensar de inmediato en la posibilidad de realizar una estructura mediante vigas prefabricadas. Sin embargo, el transcurso de la obra demostró que, aunque el esquema general era muy repetitivo, las singularidades de cada tramo, con comunicaciones verticales mediante escaleras y ascensores, las horizontales mediante

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 6.

pasillos rodantes y las diversas cargas que se aplicaban en las distintas zonas habrían obligado a vigas con una similar geometría, pero con gran variedad de armaduras. En cualquier caso, se estudiaron dos alternativas (Figura 6):

– Vigas centrales prefabricadas. Con esta solución se ejecutaban "in situ" los pilares y los tramos de viga que se encontraban sobre aquéllos hasta 2,70 m a cada lado de los mismos, montándose posteriormente sobre una junta a "media madera" las vigas centrales prefabricadas de 12,60 m de longitud.

– Vigas centrales y sobre pilar prefabricadas. En esta segunda solución sobre los pilares, que se ejecutan con hormigón "in situ", se montaba una viga prefabricada de 5,40 m y, posteriormente, la viga central de la primera opción, apoyada sobre esta última.

Este sistema prefabricado suponía una reducción del plazo de ejecución de la estructura, siempre que el mismo comenzara en una fase muy inicial del plazo de obra previsto, teniendo tiempo para proyectar los elementos prefabricados, ejecutar los mismos en factoría, trasladar a obra y montar. De forma paralela, se seguía trabajando en la solución de proyecto de estructura "in situ". Finalmente, fue ésta la opción elegida, ya que el tiempo transcurrido en los ajustes entre arquitectura y estructura por parte de los diversos equipos que debían intervenir en su diseño, por otra parte normal, llevaron a no tener una garantía de auténtica reducción del plazo y, sin embargo, sí podía llevar, con facilidad, a tener unos mayores costes.

8.2. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo previsto en el proyecto licitado tenía una serie de fases que se consideró oportuno modificar para mejorar su eficacia y orden constructivo. Las etapas constructivas previstas en la solución del proyecto eran las siguientes:

1. Ejecución de pilares "in situ".
2. Montaje de cimbras, encofrado de vigas y armadura pasiva y activa.
3. Apoyo de placas prefabricadas sobre el encofrado lateral inferior de las vigas.
4. Hormigonado de vigas y capa de compresión de forjado.
5. Una vez que el hormigón alcanzara la resistencia requerida, tesado de las vigas.
6. Desencofrado de las vigas.
7. Descimbrado de las vigas.

Se consideró que este sistema presentaba algunos puntos mejorables, tanto desde el punto de vista estructural como de ejecución. Tras el estudio correspondiente, se adoptó aquél cuyas fases se describen a continuación:

1. Ejecución de pilares "in situ".
2. Montaje de cimbras y encofrado de vigas.
3. Colocación de armadura pasiva y vainas de la activa.
4. Hormigonado de la parte inferior de la viga, hasta el nivel de apoyo de las placas prefabricadas del forjado.
5. Descimbrado y desencofrado de las vigas cuando el hormigón de las mismas había alcanzado una resistencia a compresión de 15 MPa (24 h).
6. Enfilado de cordones en las vainas.
7. Tesado de los cables cuando el hormigón hubiera alcanzado una resistencia a compresión de 25 MPa.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

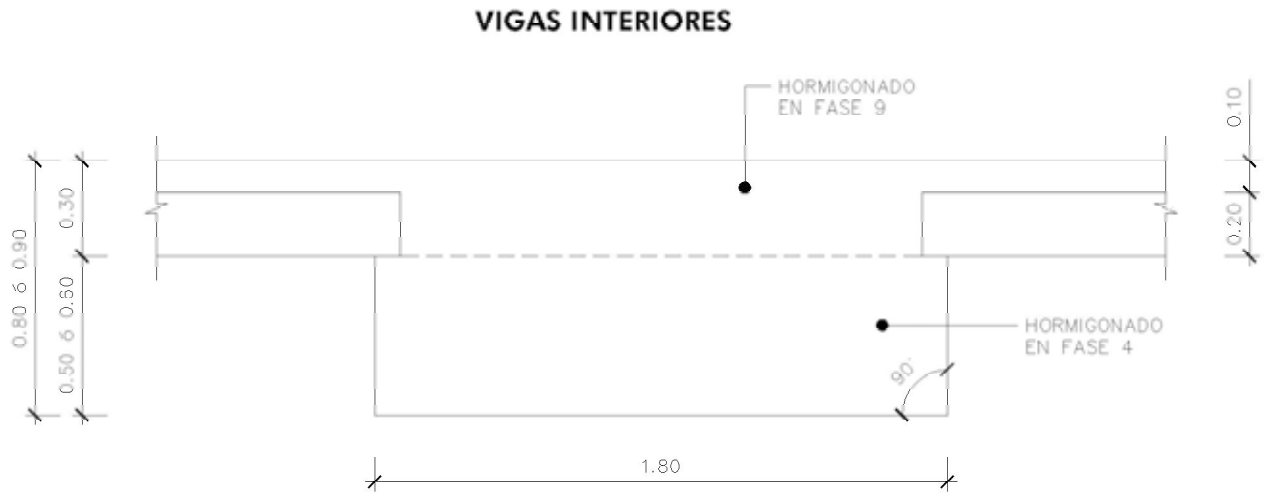


Figura 7.

8. Montaje de las placas prefabricadas del forjado.

9. Hormigonado conjunto de la parte superior de la viga y de la capa de compresión del forjado.

10. Inyección de las vainas.

En la Figura 7 se aprecia la sección de viga y forjado de manera conjunta.

Las diferencias más importantes que este sistema alternativo presentaba, con respecto a la solución de proyecto, eran las siguientes:

– Estructuralmente se tesaban las vigas antes de la ejecución del forjado. De esta forma no se sometía a éste a unas tensiones adicionales durante el tesado de las vigas, que ya se encontraban comprimidas cuando se montaban las placas prefabricadas y se hormigonaba la capa de compresión.

– La cimbra se liberaba antes, necesitando menos tiempo de ocupación. Esta circunstancia que, en otros casos de estructuras puntuales no es tan significativa, aquí sí lo era, ya que es un proceso que había que repetir a lo largo de más de 32 km de vigas. Para ello fue preciso redimensionar la armadura pasiva para que por sí misma fuera válida para resistir el peso propio de la viga.

– Se independizaban los procesos de ejecución de los pórticos principales de la estructura y el forjado. El sistema "in situ" que, finalmente, se adoptó para ejecutar las vigas, permitió comenzar su ejecución (hormigonado de la primera viga) cuatro meses después del comienzo de su proyecto constructivo en obra, mientras que el comienzo de la fabricación de más de 270.000 m^2 de piezas prefabricadas con sección especial para el forjado, requería otros plazos distintos de comienzo de obra.

8.3. Vigas postesadas

Se han realizado sobre las vigas postesadas, durante el desarrollo de la IDC, dos modificaciones fundamentales: adaptación de la armadura pasiva para que la viga pudiera resistir su peso propio sólo con esta armadura y concentración de la armadura activa en dos vainas, en lugar de las cuatro con que contaba en el proyecto original.

La cuantía de armadura activa se ha mantenido. Sin embargo, con la distribución de la misma en cuatro vainas, el cruce de éstas con la armadura de los pilares se hacía prácticamente imposible, comprometiendo seriamente la garantía que debíamos alcanzar de no presencia de coqueras internas, ni externas, durante el hormigonado.

El tesado de las vigas se ha realizado a 2,70 m de los pilares. Para poder alojar los gatos correspondientes ha sido preciso adaptar el hueco de la viga en la zona de aplicación del mismo (Figura 8). Han sido tres las empresas que han desarrollado todo el tesado de las vigas: BBR, Tecpresa y Freyssinet. Cada una disponía de sus propios gatos. El citado hueco debía tener el ancho necesario para acoger a éstos y la longitud suficiente para los mismos y para el alargamiento de los cordones. El tesado de la viga siguiente debía demorarse hasta que se hubieran realizado las comprobaciones previstas del tesado de la adyacente, ya que era preciso cortar los cordones salientes de una, resultado del tesado correspondiente, antes de tesar la contigua. De otra forma no había espacio para alojar el gato y los cordones producto de los alargamientos de la nueva.

Figura 8.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Más detalles sobre la ejecución y el control del postesado de las vigas se encuentran, respectivamente, en [12] y [10].

8.4. Vigas de borde

Además de las vigas tipo, en los extremos laterales (Este y Oeste) de las tres partes del edificio (Facturador, Procesador y Dique) se encuentran las denominadas vigas de borde cuya sección se puede apreciar en la Figura 9.

La viga de borde, tiene una sección básicamente rectangular, como las demás, pero con una forma puntiaguda en su extremo lateral exterior, buscando un mejor acabado estético. En la misma existen unos pasatubos cada 1,80 m para permitir el acceso de cables y conductos de instalaciones entre dos niveles en altura consecutivos. Además son las vigas que reciben las cargas de los puentes metálicos que comunican sobre el nivel 0, en los cañones, las tres zonas del edificio y éste con la Dársena. En el Dique, en el frente Este y gran parte del Oeste, recibe también el anclaje del muro-cortina tipo A1, atirantado.

Esta viga se encontraba prevista, en el proyecto licitado, con un recubrimiento exterior con un elemento prefabricado de hormigón no colaborante. Cuando se analizó el sistema de tesado del muro-cortina de la fachada se comprobó que era necesario incrementar la superficie de la citada viga en la que el mismo se anclaba. Esto obliga a aumentar la dimensión transversal de la viga. Para que todas las vigas de borde tuvieran la misma geometría era preciso aumentar también las correspondientes a los cañones interiores. Sin embargo, esta solución, por lo ajustado de la geometría del edificio, y por la proximidad de los soportes inclinados en "Y" de la cubierta (Figura 10), obligaría a inclinar éstos más y, con ello, modificar la geometría de aquélla. Volviendo hacia atrás con el razonamiento, como no se quería, desde el punto de vista de diseño arquitectónico, modificar la geometría de la cubierta, no se varió la inclinación de los soportes en "Y", ni el ancho total de la viga de borde. La solución fue, por tanto, aprovechar toda la sección estructural de la misma con hormigón "in situ", sin montar el recubrimiento prefabricado exterior. Para alcanzar un mejor acabado del hormigón se modificó éste, pasando de un HP40/F/20/I a un HP40/F/12/IIa. De esta forma, con un tamaño máximo de árido de 12 mm, se cuidó, aún más, el aspecto estético de la estructura. También se mejoró la calidad de acabado del encofrado.

8.5. Juntas de dilatación

Las juntas de dilatación se encuentran situadas cada 72 m y a 2,70 m del pilar más próximo. En el Proyecto licitado estas

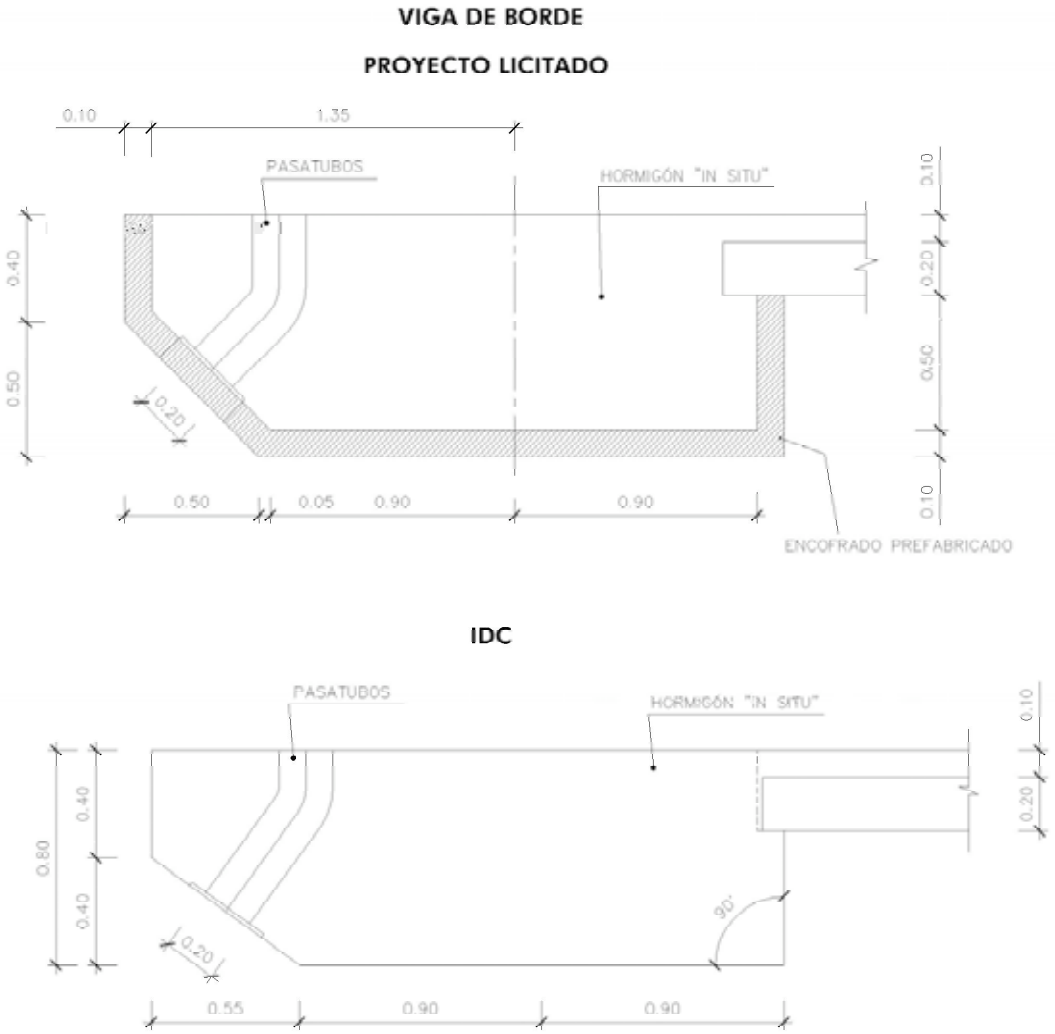


Figura 9.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

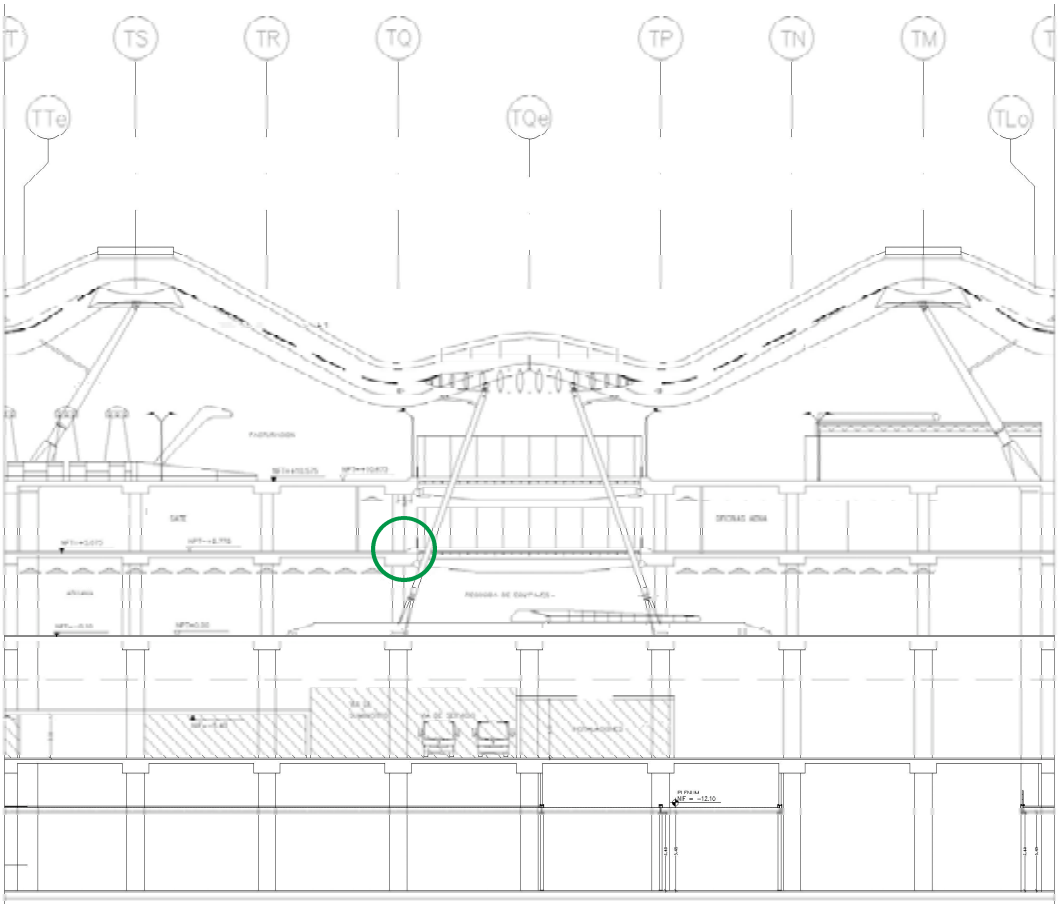


Figura 10.

juntas estaban previstas con bulones pasadores. Teniendo en cuenta que las cargas eran muy elevadas, y que la experiencia con este sistema para este tipo de juntas y cargas era muy escasa, resultando una técnica más conocida el apoyo a "media madera", se proyectaron algunas con este sistema. Sin embargo, por razones estéticas esta solución fue rechazada, ya que la visión de una "Z" en el canto de la viga no resultaba la respuesta correcta al efecto buscado.

Las cargas y los movimientos previstos eran elevados y, aunque en las tablas de las empresas especialistas en este tipo de juntas sí existían aparatos de junta para ellos, se consideró que no se encontraban suficientemente contrastadas mediante ensayos. Con el objetivo de alcanzar la máxima seguridad en todas las soluciones aplicadas, se plantearon los ensayos que se encuentran descritos en [11].

Las conclusiones finales de los ensayos, para los elementos estudiados, fueron las siguientes:

– El comportamiento hasta la carga de servicio se produce con pequeñas deformaciones, inferiores a 3 mm, no observándose fisuras en los elementos ensayados.

– El cortante máximo resistido por la junta ha resultado superior al máximo exigido en el protocolo del ensayo.

– La rotura de la probeta se produce por la pérdida de recubrimiento del hormigón existente por encima del conectador. Las investigaciones de la disposición de la armadura en el ensayo llevaron a realizar una serie de modificaciones en la misma que permitiera aumentar o mejorar su capacidad resistente.

8.6. Forjado

La estructura del forjado, en un 60% de la superficie construida del edificio se encuentra constituida por placas alveolares pretensadas prefabricadas. La distancia entre apoyos es de 7,20 m y su canto de 20 cm (con carácter general en la obra) o de 30 cm (en zonas con carga superior), teniendo una capa de compresión sobre las placas de 10 cm. Estas placas, suministradas por la empresa Vanguard, fueron fabricadas en cuatro instalaciones diferentes. El gran volumen de obra y el elevado ritmo de ejecución que la misma necesitaba obligaron a esta solución.

La fabricación y suministro de placas estándar en España se realiza con anchos entre 60 y 120 cm. Por tanto, no debía representar ningún problema, ya que existe una dilatada experiencia en el uso de este tipo de elemento. Sin embargo, la dificultad residía en que el ancho de las placas tipo del proyecto licitado era de 1,70 m. El módulo del edificio era 1,80 m (1,80x10 era la luz entre pilares, 1,80x5 era la distancia entre pórticos, 1,80 m es el ancho de las vigas, 1,80 m es el diámetro de las luminarias circulares del nivel 0 del edificio). Entre dos placas se dejaba un zuncho de 10 cm de ancho, lo que completaba, junto a los 1,70 m de placa, los 1,80 m deseados. La finalidad de este zuncho era tener un elemento en el que anclar las cintas del SATE (Sistema Automático de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

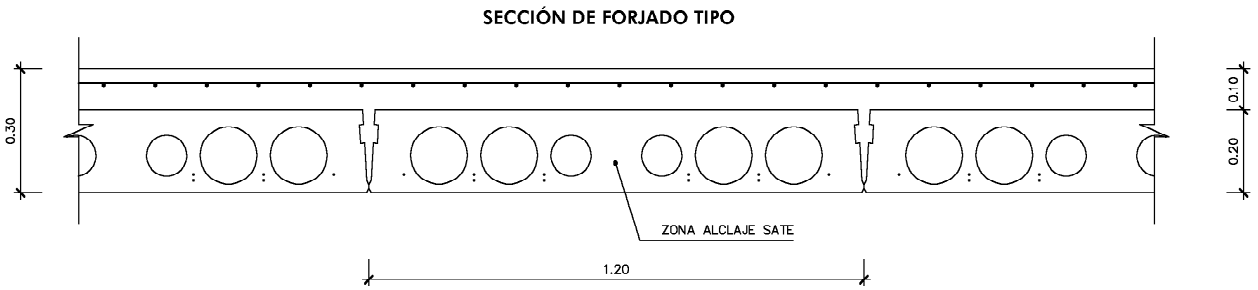


Figura 11.

Tratamiento de Equipaje). Tras el estudio correspondiente se alcanzó la solución que se aprecia en la Figura 11. Se fabricó una placa con un ancho estándar de 1,20 m, pero con una sección especial: los huecos eran circulares, no alargados verticales, y en la zona central existe un espacio macizado donde se anclan los tirantes que sujetan las citadas bandejas del SATE. Por otra parte, esta solución suponía una ventaja adicional, ya que se incrementaba en un 50% las alineaciones en las que se podía realizar el citado anclaje, al pasar la distancia entre éstas de 1,80 a 1,20 m. Las cintas del SATE, por tanto, reducían la separación entre tirantes, lo que permitía optimizar, incluso, su propia estructura.

En otras zonas del edificio los forjados estaban constituidos por losas de hormigón, placas tipo Farlap o Pi que, o bien por estar sometidas a unas cargas que así lo exigían, por necesidad de reducción del peso propio de la estructura, o bien por necesitar huecos para permitir el buen funcionamiento de los sistemas de instalaciones, sobre todo climatización, hacían recomendable su uso.

8.7. Pilares

La estructura del edificio está proyectada con dos tipos de pilares: dobles de sección rectangular en los pórticos centrales de cada una de las tres partes del edificio y circulares en los demás pórticos. Estos pilares se encontraban proyectados, igual que las vigas de borde, con un revestimiento prefabricado de hormigón.

La principal dificultad encontrada durante el análisis de la estructura era la ajustada sección estructural útil de los mismos. Así en las plantas superiores, las secciones aparentes de 65 y 80 cm de diámetro, que dejaban unas secciones útiles de 50 y 65 cm de diámetro, respectivamente, elevaban mucho la cuantía mecánica de los pilares. Por otra parte la densidad de armadura era tal que se volvía a dificultar enormemente el cruce con la de las vigas, incluso con la nueva distribución de la armadura activa de éstas ya comentada anteriormente. Los pilares rectangulares, con una sección de 1,40x1,00 m también presentaban una problemática similar (Figura 12).

Se planteó una primera solución que era la de utilizar toda la sección aparente inicial como sección útil estructural, manteniendo el recubrimiento prefabricado previsto, pero con dimensiones resultantes algo mayores. Esta solución presentaba un problema muy importante de otro orden: la evacuación. La separación interior de los pilares rectangulares era de 1,80 m. Si se disponían unos recubrimientos de hormigón a las nuevas secciones útiles, los pasillos resultantes tenían un ancho

Figura 12.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 13.

Figura 14.

insuficiente y habría que crear nuevas vías de evacuación, ocupando espacios previstos para otros usos. Por otra parte, si los pilares circulares veían aumentada su sección aparente, también afectaban a zonas de desembarco de transportes mecánicos (rampas y escaleras).

La solución adoptada fue la de suprimir el recubrimiento prefabricado de hormigón, mantener la misma sección aparente anterior, pero ahora toda ella estructural, y cuidar de forma especial los encofrados para alcanzar una elevada calidad de acabado. Sobre ésta puede ampliarse información en [9].

Sobre el nivel +2 en el Facturador y en el Procesador y desde el nivel +1 en el Dique, se levantaban los que se dio en llamar los "cuernos-pilar" (Figura 13). Desde estos pilares inclinados partían los soportes metálicos de la cubierta. La ejecución de estos pilares de hormigón, además de requerir un encofrado especial, también obligó a un cuidadoso seguimiento de la puesta en obra del hormigón debido a la propia inclinación, a su singular geometría y a la densidad de armadura, que se sumaba a las barras de anclaje de las placas que servían de apoyo a los soportes metálicos superiores.

Durante el desarrollo de la IDC también fue necesaria la creación de 195 pilares (o tramos de pilares entre niveles) nuevos, debidos, fundamentalmente, a la aparición de nuevas cargas sobre la estructura, derivadas de nuevas necesidades detectadas para el futuro uso del edificio o bien de elementos estructurales dimensionados anteriormente de forma muy estricta. Estas cargas sometían a la estructura proyectada inicialmente a unos esfuerzos y unas deformaciones que no se consideraron admisibles.

9. ESTRUCTURA METÁLICA DE CUBIERTA

La cubierta de este edificio, tanto por su diseño como por sus dimensiones, es uno de sus elementos más representativos. Su estructura sirve de soporte inferior a la cubierta propiamente dicha y superior al falso techo de bambú.

Debido a la superficie de doble curvatura y al objetivo perseguido de obtener una definición lo más precisa posible de la carga que el viento podía producir sobre una estructura de estas características geométricas, durante la fase de proyecto previa a la adjudicación de la obra se llevaron a cabo ensayos en túnel de viento en el A9 del Laboratorio de Aerodinámica del Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid.

La estructura metálica de la cubierta tiene una sección transversal al edificio que reproduce la silueta frontal de un pájaro con las alas abiertas (Figura 14). Esta figura se encuentra materializada por una viga principal armada con un canto variable entre 0,75 y 1,50 m, con alas de dimensiones 500.30 y alma de espesor 15 mm. Estas vigas principales se encuentran separadas 9,00 m.

Las vigas principales se encuentran unidas por otras secundarias curvas convexas hacia el exterior del edificio, constituidas con perfiles IPE 500, HEB 700 y HEB 500. Ambos elementos, vigas principales y secundarias, forman una superficie de doble curvatura que permite transmitir una visión de movimiento de la cubierta. La separación de las vigas secundarias, variable, se encuentra alrededor de los 3,50 m. La estructura se completa con los elementos tubulares rectangulares y circulares que constituyen el arriostramiento.

A partir del proyecto licitado, se realizaron una serie de modificaciones, tanto en materiales como en cálculo, diseño de elementos y detalles constructivos, así como en el procedimiento constructivo que se explican en [13].

10. MUROS-CORTINA DE LA FACHADA

La fachada del Nuevo Edificio Terminal responde, en general, a una tipología de muro-cortina, clasificado a su vez en ocho secciones diferentes. Se desarrollan, en su mayor longitud, entre el nivel +1 y la cubierta, con alguna excepción que nace desde el nivel -1i. Entre el nivel 0 y el nivel +1 la fachada la forman elementos metálicos y acristalados que tienen una mayor permeabilidad al movimiento de vehículos y personas.

De los ocho tipos mencionados de secciones de muros-cortina, los más significativos son el que rodea el Dique en su perímetro total, salvo en el cañón III común con el Procesador (A1), y el que constituye la fachada principal de acceso y salida de este Nuevo Edificio Terminal desde y hacia la Dársena y el Aparcamiento (A2).

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 15.

Estos muros-cortina, cuya definición, tanto de su diseño como del proceso constructivo, se describen en [8], [13] y [14], han tenido una interferencia directa tanto con las vigas de borde de hormigón (ya descrita más arriba), como con los puentes interiores que comunican el Facturador con la Dársena.

11. ESTRUCTURAS METÁLICAS INTERIORES Y PREPASARELAS

El interior del edificio alberga una serie de estructuras metálicas (puentes, escaleras de cañón, ascensores panorámicos, núcleos de transporte vertical con escaleras y ascensores-montacarga, escaleras de acceso a cubierta, escaleras de acceso a restauración, niveles -1i y -2i, comercios, cajones corta-viento, …) que, junto a las prepasarelas de acceso a los fingers, suponen un volumen no despreciable de acero cuyo proyecto constructivo, IDC y construcción contenía una dificultad considerable.

Los puentes que comunican las distintas partes del edificio a través de los cañones, tienen una luz de 16,20 m, con unas vigas principales de canto 0,95 m (Figura 15). El ancho es variable entre los 52 proyectados. Sobre estas vigas, y situados sobre unos apoyos telescópicos, se disponen unos bastidores metálicos que recogen el solado constituido por unas placas de vidrio translúcido.

Estos puentes tenían en todos los casos una junta de dilatación en uno de sus apoyos que permitía el movimiento Este-Oeste. Algunos de ellos, al encontrarse situados en la alineación de una junta de dilatación de las vigas de hormigón, también habían de contar con una junta que permitiera un movimiento transversal en el sentido Norte-Sur.

Los puentes que apoyaban sobre el muro-cortina A2, uniendo el Facturador con la Dársena, tenían además un condicionante especial en el movimiento de su junta de dilatación, ya que en el apoyo móvil sobre el citado muro-cortina había que considerar, además de los efectos térmicos sobre la estructura metálica y sobre la de hormigón en la que apoyaba el extremo Este, los movimientos propios de la fachada por efecto de la flexión debida al viento y del giro en torno a la articulación inferior provocado por los movimientos de la cubierta en la que finalizaba su extremo superior.

12. INSTALACIONES Y TRANSPORTES MECÁNICOS

La influencia de las instalaciones en la estructura del edificio se ha traducido en los efectos habituales de cargas sobre la misma y huecos para paso de conductos y, adicionalmente, en la necesidad de ampliación del plenum que permitía la entrada y salida de aire del edificio.

A lo largo del edificio existen cuatro plenum en el sentido Norte-Sur. Estos, debido a los ajustes de las necesidades manifestadas por la Propiedad a lo largo de la obra y de los cálculos que se deducían de las mismas, han requerido mayor sección de la dimensionada inicialmente. En los casos en los que, como en el Dique, el aumento de sección transversal no ha sido posible, se han dispuesto más chimeneas intermedias que permitieran distribuir adecuadamente los volúmenes de aire y su velocidad de circulación. En los casos en los que ha sido posible, se ha optado por el aumento de la sección del plenum, incrementando la estructura metálica necesaria para ello.

El sistema de climatización ha condicionado el sistema de placas prefabricadas que constituyen el forjado, ya que en aquellas zonas en las que se disponían las Unidades de Tratamiento de Aire (UTA), que se encuentran en un número superior a las 150, ha sido preciso montar unas placas PI que permitieran practicar los huecos necesarios para la salida y entrada de aire.

La instalación eléctrica ha influido en los forjados, exigiendo para ellos unas losas que soportaran las cargas de los 54 transformadores, agrupados en 18 centros.

Finalmente, debe citarse entre la labores de la OTCO la de creación de nuevos huecos (en este edificio hay “patinillos” de 30 m^2 y, por tanto, ningún hueco es despreciable), en las placas alveolares pretensadas prefabricadas, lo que ha requerido estructuras metálicas auxiliares.

Los transportes mecánicos que se han instalado en este edificio son los siguientes:

– Ascensores-montacargas

– Ascensores panorámicos

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

– Rampas mecánicas

– Escaleras mecánicas

– Pasillos rodantes

La incidencia de los mismos sobre la estructura, ya fuera sobre las vigas de hormigón o sobre las vigas metálicas de los puentes, estaba condicionada, fundamentalmente, por las elevadas cargas que escaleras y rampas han supuesto, así como por las acciones horizontales sobre los citados puentes que obligaban a diseñar un arriostramiento horizontal más importante que, en ocasiones, chocaba con los criterios de un diseño más esbelto de la arquitectura del edificio.

Otro condicionante se encontraba en el movimiento horizontal admisible por parte de los ascensores panorámicos, lo que obligaba a arriostramientos intermedios en las vigas de hormigón de los diversos niveles, ya que estas estructuras alcanzaban alturas de hasta 22 m.

13. REFLEXIÓN FINAL

Un edificio requiere siempre una buena coordinación entre la Arquitectura, la Estructura y las Instalaciones. En este caso, además, exige que la misma se haya producido entre los diversos equipos que, para cada una de las especialidades, ponían a disposición de la obra la Propiedad y Dirección de Obra, los Proyectistas, el Constructor y las empresas de Control. A pesar de las dificultades que esto entraña, del volumen de la obra a desarrollar y del reducido plazo para conseguir el objetivo, se puede afirmar que se ha alcanzado un elevado nivel de Proyecto, de Ingeniería de Detalle de Construcción y de Ejecución de obra.

Ese objetivo de desarrollo del Proyecto se alcanza con una buena organización y, sobre todo, con la voluntad y el esfuerzo de las personas que llevan adelante el trabajo. Entre éstas debe subrayarse la labor de Jesús Mendiluce como Director de Obra y de María Lasheras como Codirectora de Obra, Jesús Hernández como coordinador de los equipos de arquitectos e ingenieros que asesoraban a la Dirección de Obra en el desarrollo del proyecto y, dentro de Terminal Barajas UTE, a Francisco Asensio como Gerente y Manuel Abella como Jefe de Obra en las primeras y fundamentales etapas del proyecto. Dentro de esta publicación, este artículo ha recogido algunos de los trabajos realizados por la Oficina Técnica del Constructor en Obra (OTCO) que, aunque desarrollado por muchas personas, me voy a permitir reconocer personalizando en quienes han dirigido sus distintos departamentos: Francisco López y Ángeles Jaramago, Arquitectura; Manuel Gutiérrez y Antonio Moreno, Estructura; Antonio Requejo y Jaime Izuzquiza, Instalaciones; José Ramón Izquierdo, Delineación; y Francisco Aparicio, Informática. Muchas gracias a todos.

14. REFERENCIAS

[1] Gómez Hermoso, J.: “Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Proyecto y construcción”, V Congreso de Ingeniería del Transporte, Santander, 2002.

[2] Gómez Hermoso, J.: “Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Descripción del proyecto. Cimentación”, II Congreso de Puentes y Estructuras de edificación, ACHE, Madrid, 2002.

[3] Gómez Hermoso, J.: “Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Estructura de hormigón”, II Congreso de Puentes y Estructuras de edificación, ACHE, Madrid, 2002.

[4] Gómez Hermoso, J.: “Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Estructura metálica”, II Congreso de Puentes y Estructuras de edificación, ACHE, Madrid, 2002.

[5] Gómez Hermoso, J.: “Nuevo Edificio Terminal. Una puerta para Europa”, Cauce 2000, nº 113, noviembre-diciembre 2002.

[6] Gómez Hermoso, J.: “Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal”, XI Jornadas Técnicas “Tecnología de la Edificación”, Universidad de Cantabria, 2003.

[7] Hesse Martín, José Manuel: “Planteamiento aeroportuario de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[8] Lamela, Carlos; Moya, Paz: “Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[9] Hontoria Asenjo, Alberto: “Sistema de Calidad y su aplicación en la ejecución de la estructura del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[10] Gómez Hermoso, Jesús; Gutiérrez Bueno, Manuel; Moreno Puertollano, Antonio: “Nuevo Edificio Terminal. Singularidades, incidencias y soluciones en la ejecución de la obra”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[11] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: “Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[12] Illescas Villa, José Manuel; Sánchez de Pablo Muela, Roberto: “Pretensado en las vigas de hormigón estructural”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[13] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: “Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[14] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: “Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Tesado multipunto de la fachada del Edificio Terminal

Multipoint prestressing of the Terminal Building façade

José Manuel Peña Pascual
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
TECPRESA

RESUMEN

Una de las particularidades técnicas fundamentales del nuevo Edificio Terminal es su fachada acristalada tensada. El objeto de este artículo es el de describir la metodología y tecnología desarrollada por Tecpresa para llevar a cabo el tesado de dicha fachada, así como comentar algunas incidencias y particularidades de esta operación realizada a lo largo de mas de 2.500 m de fachada.

El artículo comenta los condicionantes del proceso de tesado que había que efectuar, describe las características fundamentales del sistema específico desarrollado para llevarlo a cabo, detalla las diferentes fases del proceso de ejecución y dedica los apartados finales a las particularidades del tesado de determinados módulos y a las incidencias surgidas durante el desarrollo de los trabajos.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, tesado multipunto, fachada, muro-cortina, computador, kipper truss.

SUMMARY

One of the technical singularities of the new Terminal Building is the glass tensioned façade. The object of this paper is the description the methodology and technology developed by Tecpresa for this façade prestressing operation as well as some incidences and particularities occurred while performing this operation along more than 2.500 m of façade.

The paper comments the the initial conditioning circumstances of the prestressing process, describes the basic characteristics of the specific system developed, details the different phases of the prestressing execution and dedicates its final sections to analyze the singularities of the prestressing of some modules and the incidences occurred during this work.

Key words: *Airport, Barajas, multipoint tensioning, façade, wall-curtain, computer, kipper truss.*

1. INTRODUCCIÓN

Como se comenta en [1] y [2], una de las particularidades del nuevo Edificio Terminal es la fachada tensada que se puede observar en las Figuras 1 y 2. El objeto de este artículo es el de describir la metodología y tecnología desarrollada a medida por Tecpresa (Figura 3) para esta operación así como las incidencias y particularidades habidas en la realización de este trabajo, llevado a cabo a lo largo de más de 2.500 m de fachada.

Figura 1. Vista transversa de la Fachada.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 2. Vista longitudinal de la Fachada.

Figura 3. Vista general equipo de tesado desarrollado por Tecpresa.

El muro cortina de las fachadas del Edificio Nuevo Terminal se apoya sobre una estructura portante en forma de pseudo-celosías de barras de acero inoxidable (Figuras 4 y 5). Estas pseudo-celosías o kipper truss [2] están formadas por cordones tracción-compresión y montantes intermedios, pero carecen de diagonales que completen el esquema que correspondería a una estructura triangulada o celosía propiamente dicha. De ahí que resulte imprescindible que se garantice que las barras de los cordones trabajen a tracción incluso con la hipótesis de cargas más desfavorables. La única forma de conseguir esta situación es la de pretensar dichas celosías.

Figura 4. Detalle vista Interior celosías de fachada.

Figura 5. Detalle exterior de la Fachada.

2. CONDICIONANTES DEL PROCESO

Dada la forma característica de estas celosías y la imposibilidad de realizar el tesado directamente sobre ellas, la aplicación del pretensado se realizó mediante unos tirantes auxiliares de barras, situados en el mismo plano de tales celosías y ligeramente retranqueados respecto a las mismas.

El cálculo de la estructura consideraba la actuación simultánea de los distintos módulos de fachada comprendidos entre juntas de dilatación; esto obligaba al tesado simultáneo y proporcional de todos ellos.

La modulación de las distintas partes de la fachada y su interacción con la estructura metálica de la cubierta de los tres volúmenes que componen el Edificio, llevo a la elección de un sistema de tesado en 16 puntos simultáneos.

Además dadas las diferencias entre las tensiones a suministrar, que existían entre unas celosías y otras (en las operaciones del Facturador y Procesador se llegaba a hasta 7 esfuerzos finales diferentes) se necesitaba un sistema que permitiese el control independiente o simultáneo de los diferentes gatos tanto en esfuerzos como en desplazamientos.

Por último, por condicionantes de cálculo se necesitaba un sistema con un error inferior al 2% en términos de esfuerzos y precisiones de 0.1 mm en desplazamientos.

3. CARACTERISTICAS DISTINTIVAS DEL SISTEMA DESARROLLADO

Tecpresa desarrolló a medida para esta obra un sistema hidráulico computerizado que cumpliese con todos los condicionantes antes descritos.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

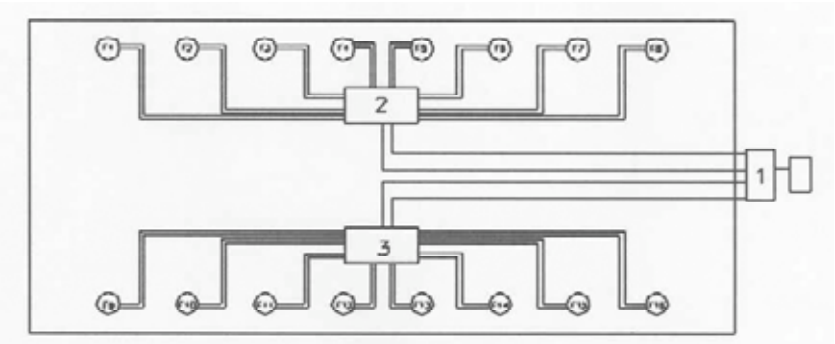


Figura 6. Esquema general disposición equipo de tesado para módulos simétricos con 16 gatos: F1-F16 Gatos de Tesado; 1 Pupitre de Control; 2-3 Sistemas de Distribución y desplazamiento.

Este sistema es completamente diferente al tesado estándar de barras, realizado de una en una mediante gato hueco y leyendo los alargamientos mediante ayuda de un flexómetro.

El sistema estaba constituido por 16 cilindros hidráulicos (Figuras 6 y 7) de 100 toneladas de capacidad cada uno y una carrera máxima de 250 mm con transductores de presión y desplazamiento (Figura 8)

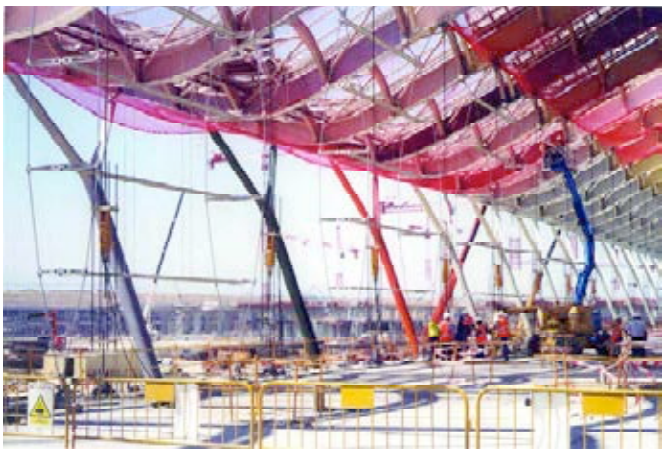


Figura 7. Vista de ocho de los gatos del sistema.

Figura 8. Detalle de uno de los gatos

Dichos transductores enviaban las señales al pupitre de control donde se podían leer individualmente ambas medidas para cada uno de los gatos.

Dados los condicionantes que tiene una obra, se eligió un pupitre de control mediante programador electrónico (Figura 9), prescindiendo así del uso de ordenadores y de la fragilidad de los mismos. No obstante este pupitre también dispone de interfaz para la conexión al mismo, en que caso de que así se quisiera.

Como ventajas del pupitre frente a otros sistemas, aparte de la robustez que proporciona, éste añadía la de tener visores independientes para cada uno de los gatos, de tamaño generoso (Figura 10), de tal forma que todo el personal que participaba del control de la operación, podía leer con facilidad los datos.

Figura 9. Detalle Pupitre de Control.

Figura 10. Visores de medida para cada uno de los gatos.

Este programador (Figura 11) permitía operar tanto en desplazamientos como en fuerzas, con un error inferior al 2% en términos de esfuerzos y precisiones de 0.1 mm en desplazamientos. Así mismo permitía actuar sobre un gato independientemente, sobre varios de ellos a la vez o sobre el conjunto completo de los mismos.

Al comienzo de cada operación se programaban los datos de partida por escalones definidos por el proyectista.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 11. Detalle Programador electrónico.

Figura 12. Detalle Sistema de desplazamiento en la obra.

Así se fijaba la carga máxima en toneladas para cada uno de los gatos o un conjunto de los mismos y el paso de desplazamiento relativo entre los distintos gatos, pudiendo estar éste en 0.5 mm.

Esto implicaba que los gatos se podían mover de 0.5 mm en 0.5 mm de tal forma que se esperaban unos a otros asegurando que el desplazamiento era siempre el mismo en todos los puntos de la cubierta, parámetro de vital importancia en los módulos con distintos esfuerzos como se mencionará más adelante.

Por otro lado y dado que el ritmo de tesado era de un módulo completo por semana, se desarrolló un sistema de desplazamiento del conjunto que permitiese el rápido movimiento de todo el equipo incluyendo mangueras a lo largo de los más de 1.000 m de longitud que tenía el dique (Figura 12).

El sistema de tirantes provisionales era sencillo, ligero y modulable (Figura 13), permitiendo su rápido montaje y desmontaje para su traslado, así como su empleo para las diferentes longitudes y tipologías de módulos de fachada (facturador, procesador y dique [1]). Estos tirantes permitían mantener la tensión y así disponer de los gatos para la realización de nuevas operaciones. Se prepararon 56 conjuntos de tirantes provisionales.

El disponer de 56 juegos de tirantes fue motivado por el hecho de que se quería contar, en la situación más exigente, con dos módulos completamente preparados para su tesado. Esta situación de máxima exigencia correspondía a la de un módulo simétrico con 16 puntos de tesado y la parte central del dique con 40 puntos de tesado.

En el resto de casos, al contar con 56 juegos de tirantes se podían tener preparados un mínimo de tres módulos a falta de

Figura 13. Detalle tirantes provisionales.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

colocar los gatos y tesar. Esto fue muy útil ya que permitía, una vez tesado un módulo, colocar los kipper truss, mientras se tesaba o destesaba otro distinto, lo cual daba agilidad a la operación.

4. PROCESO DE EJECUCIÓN

4.1. Proceso general de la operación

El proceso comenzaba con la colocación de los tirantes provisionales y los gatos en el módulo a tesar. Una vez colocados éstos se procedía al cuelgue de los kipper-truss del módulo, dejando libre la parte inferior del mismo.

Posteriormente, se procedía a la maniobra del tesado con los gatos a la carga requerida para cada uno de ellos. Se comprobaba la topografía final del conjunto cubierta-fachada y losa para, si todo estaba dentro de las tolerancias del kipper-truss, fijar el mismo al forjado. Finalmente se destesaban los tirantes provisionales, transfiriendo la carga de los gatos a los kipper-truss.

En el caso de que hubiese que realizar modificaciones en los kipper-truss, se mantenía la carga del tirante provisional y se liberaban los gatos para poder ejecutar otro módulo.

4.2. Descipción del proceso de Tesado

4.1.1. Datos de partida

Los datos de partida para cada uno de los tirantes de cada módulo eran:

- Secuencia y escalones de carga.
- Carga máxima.
- Desplazamiento máximo y por escalones.

4.1.2. Programación del equipo

En primer lugar se procedía a programar el equipo de acuerdo con los siguientes pasos:

- La carga máxima se introducia en los indicadores de presión. En caso de escalones se fijaba en primera instancia la carga del primer escalón y así sucesivamente, hasta la carga máxima.
- Se seleccionaban los cilindros mediante actuación de la CPU sobre los que se quiere actuar.
- Se introducía la carrera máxima o deseada para la operación en la CPU.

4.1.3. Puesta en marcha y tesado

A continuación se arrancaba el equipo y se dejaba trabajar hasta que se alcanzaba uno de los valores límite programados, momento en el que el equipo se detenía.

Una vez terminada la operación se podían realizar ajustes unitarios o de varios de los tirantes volviendo a programar el equipo con los valores deseados.

4.1.4. Seguimiento y registro de datos durante la operación de tesado

A lo largo de la operación se iban registrando los siguientes datos:

- Escalones de carga si los hubiera
- Toneladas máximas permitidas por la estructura.
- Desplazamientos máximos permitidos por la estructura.

A su vez para cada uno de los tirantes provisionales queda registrado:

- Nº de escalón de carga
- Toneladas y desplazamientos teóricos para ese tirante por escalones o totales
- Toneladas y desplazamientos reales para ese tirante por escalones

5. PARTICULARIDADES DEL TESADO DE ALGUNO DE LOS MÓDULOS

La distribución de la terminal en tres volúmenes obligó a los siguientes tesados singulares:

a) Módulos simétricos en la zona de Dique libre de 72 m de longitud y 36 de anchura tesados con 16 gatos a 64 toneladas los 12 interiores y a 70 los 4 de los extremos (fachada tipo A-1) (Figura 14).

Figura 14. Vista general módulo simétrico con 16 gatos.

Éste era el módulo estándar en base al cual se desarrolló el equipo, como se ha podido ver en Figuras anteriores. Este se encontraba en toda la zona simétrica del Dique.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 15. Tesado en vacio de uno de los módulos.

Hay que reseñar que previamente al tesado de estos módulos, así como de cada una de las configuraciones nuevas, se realizaron tesados en vacío (Figura 15) con el único fin de comprobar que la rigidez estructural de la cubierta coincidía con la de cálculo y en caso contrario redefinir todo el proceso con los resultados obtenidos in situ.

Cabe destacar que en los primeros tesados se dispuso de galgas extensiométricos, para corroborar la tensión a la que quedaban las estructuras de celosía una vez depositadas la tensión en las mismas.

b) Módulos asimétricos de 320 m de longitud en la fachada libre de la zona de Dique que comunica con el procesador (fachada tipo A-1).

Para ello fue necesario el uso de 40 Tirantes provisionales y el tesado de las mismas en fases mediante los 16 gatos (Figura 16). De tal forma que entre fase y fase se depositaba la tensión en los tirantes provisionales. En la Tabla 1 se indica la secuencia de movimiento de los gatos que se realizó con los 16 gatos para el tesado de los 40 puntos así como la secuencia de carga seguida.

c) Módulos asimétricos en el Facturador con hasta 7 tipos de esfuerzos finales requeridos y tesado con 12 gatos (fachada tipo A-5).

En estos módulos, los gatos y tirantes se colocaban a la inversa que en los módulos estándar, debido a la existencia de un forjado intermedio (Figuras 17 y 18).

Esta disposición a la inversa permitía seguir controlando la fachada y los elementos de tesado en el mismo nivel, ya que de otra forma los equipos de tesado tendrían que

Tabla 1. Secuencia de movimiento de gatos y de carga en módulos asimétricos de fachada tipo A-1.

% CARGA	PUNTOS DE TESADO																																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
33%	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																								
33%																									×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
66%																	×	×	×	×	×	×	×	×																
100%	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×																								
100%																									×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
100%																	×	×	×	×	×	×	×	×																

Figura 16. Módulo asímétrico del Dique.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 17. Vista lateral módulo facturador.

Figura 18. Detalle sistema invertido fachada tipo A-5.

haberse colocado en un nivel inferior, perdiendo la perspectiva del conjunto de la operación.

Para estos módulos con esfuerzos diferentes era fundamental la posibilidad que tenía la máquina de funcionar en control de desplazamientos, de tal forma que se realizaban escalones de 0.5 mm en 0.5 mm.

Esto permitía observar si las cargas iban proporcionalmente a lo esperado en los distintos escalones ,así como realizar ajustes unitarios en cada uno de los gatos, teniendo controlado el desplazamiento de la cubierta.

d) Módulos asimétricos en el Dique y Procesador con 16 gatos a dos niveles diferentes en plantas de 57 y 36 m de anchura respectivamente y diferentes esfuerzos finales para cada uno de los gatos (fachada tipo A-1 y A-5; Figuras 19 y 20).

Por cálculo y proceso constructivo estos módulos se tenían que tesar al mismo tiempo, lo cual supuso el tesado en dos niveles diferentes, así como con gatos colocados unos a al inversa de otros y con distintos esfuerzos de tesado.

El sistema de Tecpresa debido a su sencillez práctica permitió desarrollar esta operación sin ninguna complicación.

6. INCIDENCIAS DURANTE EL TESADO

Dentro de las incidencias que surgieron durante el tesado cabría destacar:

– **Falta de alineación entre las esperas del forjado y las orejetas de unión de la cubierta para el tirante provisional:** esto supuso que previamente a las operaciones hubo que recolocar alguna de las esperas del tirante provisional y retaladrar las placas de reparto del mismo para respetar las tolerancias admisibles.

– **Diferencia entre las rigideces reales y las teóricas de proyecto:** esto implicó el recálculo de las estructuras con los datos reales obtenidos en campo con la operación de tesado.

Este problema es habitual en estructuras metálicas con soldaduras en obra, estando comprobado en otras tipología de estructuras metálicas como puentes atirantados.

– **Tesado de módulos no libres:** en uno de los tesados de la zona asimétrica, se procedió a comenzar el tesado

Figura 19. Vista parcial Tesado conjunto de Dique y Procesador.

Figura 20. Vista parcial Tesado conjunto de Dique y Procesador.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

estando este tramo de la estructura unido al módulo contiguo, teniendo que parar el proceso y liberar la estructura.

7. CONCLUSIONES

Como principal conclusión indicar que gracias al uso de la electrónica en la construcción, se pueden realizar soluciones a medida para proyectos especiales que difícilmente se podrían llevar a cabo sin la misma.

Es importante el pensar los condicionantes que tiene una obra a la hora de la elección del sistema de ejecución de la misma y desarrollar medios suficientemente robustos frente a golpes, inclemencias del tiempo y vándalos ocasionales, para evitar disgustos en la realización de las posteriores operaciones.

Así mismo en operaciones repetitivas como lo fue la anteriormente descrita es fundamental el pensar en las singularidades a lo largo del proceso así como los ritmos de trabajo, que van a ser finalmente las que condicionen la elección del sistema.

8. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la UTE (ACS, Ferrovial Agroman, FCC, NECSO y SACYR) la confianza depositada en Tecpresa para la realización de esta operación singular en el Nuevo Edificio Terminal del Aeropuerto de Barajas.

REFERENCIAS

[1] Lamela, Carlos; Moya, Paz: “Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: “Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Peña Pascual, José Manuel: “Tesado Multipunto de la Cubierta de la Nueva Terminal de Barajas”. III Congreso ACHE Noviembre 2005.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Pretensado en las vigas de hormigón estructural

Prestressing of structural concrete beams

José Manuel Illescas Villa
Ingeniero Industrial
BBR PTE

Roberto Sánchez de Pablo Muela
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
BBR PTE

RESUMEN

El Edificio Terminal es una estructura de edificación en la que se ha aplicado la técnica del postesado de una forma extensa y sistemática.

Los tendones utilizados en las vigas están formados por 15 cordones de ϕ 0,6". La cantidad de acero activo empleada, mas de 1.000.000 Kg, supera con mucho el orden de magnitud de las aplicaciones típicas de postesado en edificación.

Gracias al control sistemático de cada una de las operaciones realizadas, la instalación del postesado ha sido un proceso con un nivel de calidad muy elevado.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, postesado, calidad, sistemática.

SUMMARY

The use of the post-tensioning technology in this building structure has been extensive and systematic.

The tendons used are composed of 15 strands ϕ 0,6". The quantity of pre-stressing steel, more than 1.000.000 Kg, is really more than the usual in post-tensioned buildings.

The quality of the post-tensioning process is very high due to a systematic control of all the installation steps.

Key words: *Airport, Barajas, post-tensioning, quality, systematic.*

1. INTRODUCCIÓN

Sólo en contadas ocasiones, dentro del campo de la edificación, dispone la técnica del pretensado de una aplicación tan extensa y, a la vez, simple y adecuada. Este es el caso de las vigas de hormigón estructural del Edifico Terminal.

Al tenerse en cuenta en la concepción del proyecto estructural un desarrollo industrializado del proceso constructivo de la estructura se consigue que la definición de los distintos elementos que la componen, entre ellos el pretensado, sea homogénea y simple. Esta definición del pretensado, así como la gran cantidad de recursos dispuestos, facilitaron la instalación de las más de mil toneladas de acero activo incluidas en este proyecto.

En la Tabla 1 se recogen los datos fundamentales del pretensado utilizado en las vigas de la estructura de hormigón del edificio Terminal.

Tabla 1. Medición del pretensado en tendones

Tipo Anclaje	Nº Anclajes	Vaina ∅92 (m)	Acero activo (Kg)
15 ∅0,6"	1.896	68.256	1.127.248

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 1. Anclajes de tendones de postesado en vigas.

2. DESCRIPCIÓN DEL TENDÓN DE POSTESADO

El número de tendones en cada viga es de 2 x 15 ∅ 0,6". Inicialmente estaban previstos 4 x 12 ∅ 0,6", pero con el cambio realizado disponiendo solo dos tendones pero más potentes (Figura 1), se conseguía, manteniendo la cuantía de pretensado, reducir la duración de operaciones de enfilado, tesado, e inyección, así como reducir el espacio ocupado, en una sección muy limitada, por los anclajes activos [1] [3].

El tendón tipo utilizado en el postesado de las vigas está compuesto por 15 cordones de 0,6" alojados en vaina circular y con inyección posterior adherente. Este tendón de 72 m de longitud, por tamaño y diseño, es más propio de puentes que de estructuras de edificación donde los tendones empleados suelen tener un tamaño menor o una forma peculiar (vainas ovaladas, cordones autoprotegidos, etc.).

La tipología del postesado utilizada se adapta perfectamente a la geometría de la viga y al proceso constructivo. De esta forma se optimizan las fuerzas aplicadas y se asegura una adecuación a los ciclos de ejecución de una viga hormigonada in situ.

Los elementos y materiales que componen este tipo de tendón son:

- Anclaje
- Vaina
- Cordón de acero activo
- Lechada de inyección

Anclaje

El anclaje utilizado está constituido básicamente por (Figuras 2 y 3):

- Placa de apoyo.
- Trompeta.
- Núcleo de anclaje.
- Cuñas

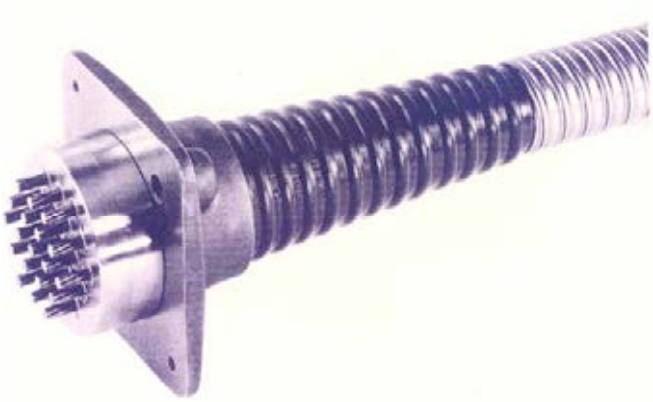


Figura 2. Anclaje típico de pretensado.

Algunas vigas, por necesidades del proceso constructivo, tuvieron que ser ejecutadas en dos fases, siendo necesaria la utilización de anclajes de continuidad para la armadura activa (Figura 4). Este tipo de anclajes permiten postesar una fase de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

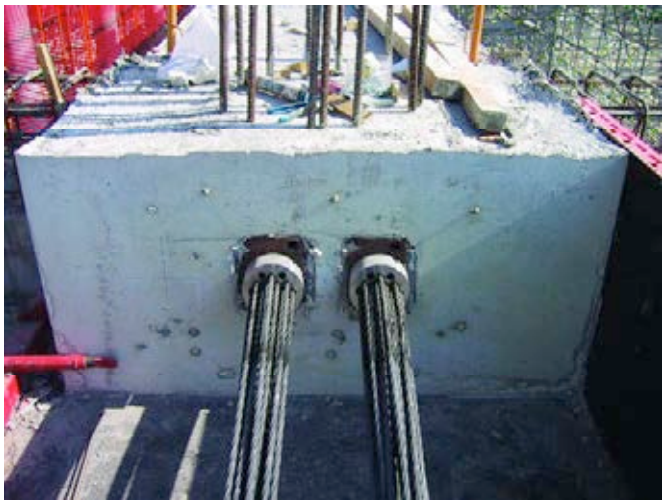


Figura 3. Disposición de anclajes en la viga.

Figura 4. Anclaje de continuidad.

hormigonado y, a su vez, dar continuidad a los cordones de acero activo para poder postesar una segunda fase.

Vaina

Se ha utilizado vaina corrugada flexible de fleje de acero (Figura 5). Este tipo de vaina permite realizar con facilidad las uniones entre los distintos tramos de montaje.

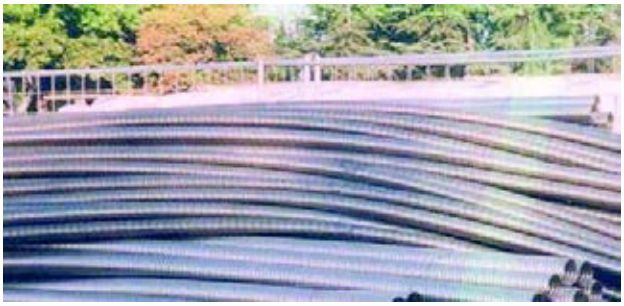


Figura 5. Acopio de vaina corrugada flexible.

Cordón de acero activo

Cordón de siete alambres tipo Y-1860-15,2 según UNE 36094 con las características que se recogen en la Tabla 2.

Lechada de cemento

Para la lechada compuesta por cemento, agua y aditivo, empleada para la inyección, se utilizó cemento del tipo CEM I 42,5 y un aditivo aerofluidificante. Las relaciones agua cemento, dependiendo del tipo de cemento, oscilaron entre 0,38 y 0,43.

3. EJECUCIÓN DEL POSTESADO

Los trabajos de suministro e instalación del pretensado fueron llevados a cabo por tres empresas especialializadas: BBR PTE, FREYSSINET y TECPRESA.

Las principales operaciones en la instalación del postesado de los tendones de las vigas fueron las siguientes:

– Colocación de placas de anclaje y trompetas.

– Colocación de vainas.

– Enfilado.

– Tesado.

– Inyección.

Colocación de placas de anclaje y trompetas

Sobre el encofrado se colocan unos cajetines en los que se fija mediante tornillos la placa de anclaje y trompeta (Figura 6). Mediante estos cajetines se consigue dar al extremo del tendón el ángulo correcto y asegurar espacio suficiente tanto para introducir el gato de tesado correctamente sobre el anclaje, como para realizar el posterior sellado del anclaje.

Al utilizarse distintos sistemas de pretensado fue necesario la adaptación de los cajetines de anclaje para la admisión de los diferentes sistemas, ya que en cada uno son distintas las dimensiones de placas de apoyo y gatos de tesado.

Tabla 2. Características de los cordones Y-1860-S7-15,2

Diámetro (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Masa (kg/m)	Sección transversal (mm^2)	Módulo elástico (kN/mm^2)	Valor característico mínimo de la carga de rotura (kN)
15,2	1860	1,101	140	195	260

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 6. Fijación de placa y trompeta al cajetín de pretensado.

Figura 7. Enfiladora.

Enfilado

El enfilado de los tendones se realizó cordón a cordón, utilizando enfiladora eléctrica (Figura 7). El enfilado se realizó preferentemente antes del hormigonado para facilitar la resolución de posibles incidencias surgidas durante dicho enfilado, ya que de esta manera se dispone de un acceso directo a la vaina.

Tesado

Tras cumplir con los requisitos previos (plan de tesado aprobado y gatos tarados) se procedía a la verificación del manómetro y al tesado de los tendones, anotando en la hoja de control correspondiente los datos relevantes (presiones, fuerzas, alargamientos, incidencias, etcétera.).

Durante el desarrollo del proyecto se realizó un detallado estudio de los nichos de tesado (Figura 8) para poder introducir y sacar el gato de tesado, minimizando las dimensiones de dichos nichos y adecuándolos para que fueran compatibles con los distintos sistemas de pretensado utilizados.

Al disponer las vigas de únicamente dos tendones de pretensado, un error en la fuerza de uno de los tendones tendría una repercusión mucho mayor que en secciones con más tendones. Por este motivo fue necesario un procedimiento estricto de control de pretensado [2] [4]. Además de los preceptivos calibrados de gatos y manómetros, fundamentalmente, se

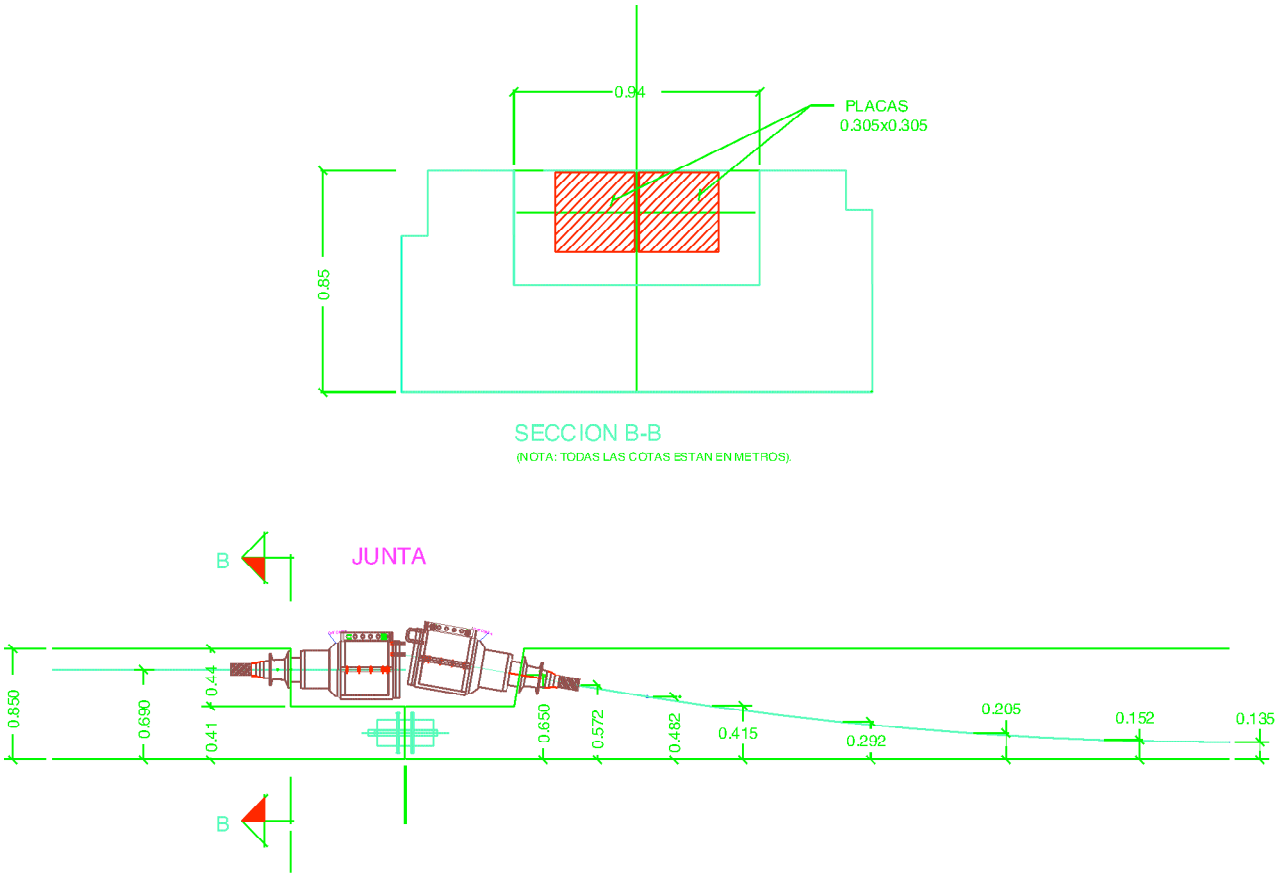


Figura 8. Nichos para colocación de gato de tesado.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 9. Equipo de inyección.

comprobaba, durante el tesado, y no después, que el alargamiento real en cada escalón de 100 bar no difería en más del 10% del de los otros tendones de igual trazado y longitud, y sobre todo, del de los escalones de carga anteriores en el mismo tendón. En caso de observarse diferencias superiores el tesado se detenía inmediatamente antes de llegar a la fuerza definitiva.

Inyección

Una vez aprobado el proceso de tesado se procedía al corte de sobrelongitudes de cordón y al sellado de anclajes.

Antes de comenzar la inyección de un grupo de tendones se ensayaba la viscosidad de la lechada con la relación agua/cemento de partida. Esto es necesario dada la dispersión de las características del cemento por fabricante, materias primas, temperatura ambiente, humedad relativa del aire, etc. Para ello se efectuaba un ensayo de la primera amasada con el cono de Marsch midiendo el tiempo en que tarda en vaciarse, debiendo estar comprendido entre unos valores predeterminados. Si no se cumplía se variaba la relación agua-cemento hasta encajar el tiempo de vaciado en el margen permitido. Con la dosificación así obtenida se realizaba la inyección de los tendones de pretensado.

Para la fabricación de la lechada de cemento y su inyección en los tendones se dispuso de equipos de inyección (Figura 9) compuestos por una amasadora, un agitador y una bomba de inyección con las siguientes características.

- Rendimiento de fabricación de la lechada: 1.000 l/h
- Caudal máximo: 5.000 l/h
- Presión máxima: 12 bar

La inyección se realiza introduciendo la lechada desde un anclaje, eliminando el aire por las purgas situadas en los puntos altos de la vaina y en el anclaje opuesto. Una vez purgado el aire se procede a dar presión a la lechada para asegurar un correcto relleno del interior de la vaina.

Este proceso de purgado, unido a la elaboración de una lechada de gran calidad, en la que se controlan los parámetros de fluidez, tiempo de trabajabilidad de la mezcla, exudación y reducción de volumen, garantizan la protección de los tendones de pretensado durante toda la vida útil de la estructura.

4. CONTROL DE LA EJECUCIÓN DEL POSTESADO

Todo el proceso de instalación de pretensado fue definido en unos procedimientos que recogían en detalle la sistemática de cada una de las operaciones a realizar. Estos procedimientos generaban una hoja de control por cada actuación, asegurando la completa trazabilidad de las operaciones. En concreto se crearon las siguientes hojas de control:

- Hoja de control de colocación de placas de apoyo y trompetas.
- Hoja de control de colocación de vaina.
- Hoja de control de enfilado.
- Hoja de control de tesado.
- Hoja de control inyección.

Gracias a este completo registro de hojas de control, la instalación del pretensado se ha convertido en uno de los procesos más controlados y con mayores niveles de calidad en la ejecución de las estructuras de hormigón in situ [4].

REFERENCIAS

[1] Gómez Hermoso, Jesús: “Relación entre el proyecto, la ingeniería de detalle de construcción y la ejecución del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Gómez Hermoso, Jesús; Gutiérrez Bueno, Manuel; Moreno Puertollano, Antonio: “Nuevo Edificio Terminal. Singularidades, incidencias y soluciones en la ejecución de la obra”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: “Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] Hontoria Asenjo, Alberto: “Sistema de Calidad y su aplicación en la ejecución de la estructura del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Sistema de Calidad y su aplicación en la ejecución de la estructura del nuevo Edificio Terminal

System of Quality and their application in the execution of the structure of the new Terminal Buiding

Alberto Hontoria Asenjo
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ingeniero de ACCIONA Infraestructuras
Jefe del Dpto. Calidad y MA de Terminal Barajas UTE

RESUMEN

Para la gestión de la calidad en la realización del proyecto constructivo y ejecución del Nuevo Edificio Terminal Barajas, una de las mayores obras de edificación del mundo, con altos estándares de calidad, servicio y seguridad, con interfaces con otros proyectos y con ritmos de producción elevados, Terminal Barajas UTE, formada por ACS, FCC, FERROVIAL, ACCIONA Infraestructuras y SACYR, integró sus sistemas de gestión, tecnología y experiencia con los de las organizaciones y empresas colaboradoras por medio del trabajo en equipo de técnicos y mano de obra de muy diversas especialidades, desde el inicio de los procesos constructivos, aplicando innovaciones tecnológicas y alcanzando estándares de excelencia.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, sistema de gestión de la calidad / integración / excelencia / interfaces / estándares.

SUMMARY

For management of the quality in the accomplishment of the project constructive and execution of the NET Barajas, one of the greats works of construction of the world, with high standard of quality, service and safety, with interfaces with other projects and with high production paces, Terminal Barajas UTE, formed for ACS, FCC, FERROVIAL, ACCIONA Infraestructuras and SACYR, integrated theirs management systems, technology and experience with the of the organizations and collaborative companies by middle of the work in technical personnel and labor equipment of very various specialties, from the beginnings of the constructive process, applying technological innovations and reaching standard of excellence.

Key words: *Airport, Barajas, management system of the quality / integration / excellence / interfaces / standard*

1. PRESENTACIÓN

La Unión Temporal de Empresas TERMINAL BARAJAS UTE, en adelante **UTE**, formada por las cinco grandes Constructoras, referentes en el sector, ACS, FCC Construcción, FERROVIAL-Agroman, ACCIONA Infraestructuras y SACYR, se constituyó en 1999 para concursar al proyecto constructivo del Nuevo Edificio Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas, en adelante **NET Barajas**, una obra de edificación de 647,5 millones de de presupuesto actual, de las mayores del mundo, e integrada en el Plan Barajas.

El NET Barajas se compone de tres volúmenes (Facturador, Procesador y Dique de embarque a aeronaves) paralelos de tres plantas cada uno sobre la rasante de la plataforma, más hasta tres niveles bajo rasante y está unido, mediante el volumen Dársena, al edificio de Aparcamiento [1].

Las obras se iniciaron en Mayo de 2000 y se mencionan algunos datos significativos que dan idea de las dimensiones de la obra:

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 1.

Superficie construida	470.261 m^2
Movimientos de tierras	3.000.000 m^3
Hormigón	543.000 m^3
Encofrados	365.000 m^2
Acero	63.000 t
Muro cortina	43.500 m^2
Cubierta	154.000 m^2
Falso techo de bambú	143.700 m^2
Fachada	56.000 m^2
Transporte mecánico	121 Uds.

El tratamiento de la calidad durante el desarrollo de las obras se ha basado en los sistemas de gestión de la calidad según las Normas ISO 9000, con un especial énfasis en la coordinación e integración de los sistemas de los agentes participantes (AENA, Dirección Técnica, Constructor, Proveedores, etc).

El sistema de la calidad aplicado en la UTE fue moldeado durante los primeros 15 meses de obra por medio de Planes de Mejora (ha sido reeditado hasta 4 veces), hasta adecuarlo a los procesos organizativos que se constituyeron. Se parte de que cada una de las empresas de la UTE dispone de sus respectivos sistemas certificados por las normas ISO 9000 y 14000 (sistema de gestión medioambiental) y de que se adoptan como base de trabajo los sistemas de ACCIONA Infraestructuras. El sistema cumple e incluye los siguientes requisitos:

- Las directrices marcadas por Plan Barajas de AENA como referente de coordinación, organización, planificación e interacción con interfaces, para el cumplimiento de sus requisitos y de las partes interesadas tales como Aeropuerto y compañías aéreas, Ministerios de Medio Ambiente, Fomento e Interior, Comunidad Autónoma y Ayuntamiento de Madrid, asistencias técnicas y asesores específicos (UTE TR-SEG, Richard Rogers Partnership-Estudio Lamela-INITEC, alguno de ellos certificado), usuarios finales y la propia Sociedad.

- Integrar a los sistemas de gestión de la calidad de los colaboradores (proveedores), a los que se les requería su aplicación como base para llegar a acuerdos de colaboración durante la obra, o la transferencia del sistema de la UTE.

- Los requerimientos técnicos de una obra de edificación de altos estándares de calidad y seguridad, con interfaces con otros proyectos y expedientes, de un tamaño muy superior al convencional y con ritmos de producción elevados.

En las condiciones contractuales establecidas, la UTE junto a sus colaboradores, llevó a cabo de forma simultánea, la realización del proyecto constructivo y la ejecución del NET.

El proyecto constructivo incluyó el diseño y cálculo de unidades de obra y la ingeniería de detalle de construcción, con procesos complejos de intervención por parte del Cliente que impusieron una forma dinámica en su realización, abierto a modificaciones para corregirlo o adecuarlo a nuevas necesidades. Las tecnologías informáticas disponibles, utilizadas por técnicos de adecuada experiencia, permitieron reducir el tiempo y aumentar la seguridad de realización del proyecto así

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

como la custodia y transmisión de su información a las partes interesadas.

Estas circunstancias hicieron necesario, entre otras condiciones, establecer una gestión por parte de UTE que fuera integral con respecto a los colaboradores (proveedores), para la definición, planificación, control y coordinación en la elaboración del proyecto constructivo del NET Barajas y su ejecución. Este sistema de gestión y comunicación sería reflejo del que Plan Barajas tiene establecido con la UTE y el resto de sus contratistas y fue clave para el éxito de su MISIÓN de responder a las expectativas a corto, medio y largo plazo de Plan Barajas, cumpliendo con sus valores y objetivos estratégicos.

Con ello se redujeron los tiempos y costes en las interfases entre UTE y sus colaboradores, mediante eliminación de tiempos muertos, burocracias y posibilidad de errores, en base a los acuerdos contractuales que fueron concebidos, definidos y documentados mediante IDC´s (Ingeniería de Detalle Constructivo) [2], PAC´s de actividad (Planes de Aseguramiento de la Calidad), PSS (Planes de Seguridad y Salud) y PVA (planes de Vigilancia Medioambiental).

A su vez los colaboradores directos implicaron en este método de trabajo a sus colaboradores, incluso se favoreció la creación de uniones temporales entre ellos para aunar sus potenciales, expandiendo de esta manera el ámbito de influencia a toda la cadena de suministros y servicios.

Todo ello debió diseñarse y aplicarse salvando el evidente riesgo de que la presión, en cuanto a plazos y al dinamismo en la realización del proyecto, pudieran poner en tensión los procedimientos de gestión y aseguramiento y afectar a la transparencia del proceso constructivo y la calidad final de la obra, al generar en obra un significativo incremento del control y revisión de documentos, y por tanto, de burocracia, no asumible a pie de tajo.

Para obtener el modelo de esta gestión integral, UTE realizó un ejercicio de “Benchmarking” o de “comparación para la mejora” que consistió en la recopilación de conocimientos y experiencia (know how) de cada empresa de su relación con AENA, así como de la ejecución de grandes obras civiles y de edificación, para ser analizadas y adaptadas a un proyecto de estas dimensiones. Como premisa de partida, fue necesario disponer de:

- La planificación de necesidades y capacidades en base a especificaciones del proceso. Se estableció como un objetivo primordial la sistematización al máximo del proceso constructivo.

- El personal más capacitado y participativo (técnicos, económicos y mano de obra), integrado en un equipo multidisciplinar, que mediante la valoración de su desempeño profesional y el plan de formación, creó una cultura común generadora de sinergias.

- Colaboradores adecuados de confianza y capacidad contrastada, que se integraron en el plan de formación y sensibilización (hasta 500 grandes subcontratistas y suministradores).

- Condiciones ambientales adecuadas (comunicación y planificación) con un liderazgo uniforme y coherente con la envergadura del Proyecto, que aunó diferentes estilos de gestión, con despliegue a nivel local de las políticas de Prevención, Calidad y Medio Ambiente, de mismas directrices que las de Plan Barajas, con revisión y valoración periódica de objetivos y con una sistemática de reuniones y una red de comunicación para disponer de información actualizada en las actuaciones de obra y evitar silos de ella fragmentada.

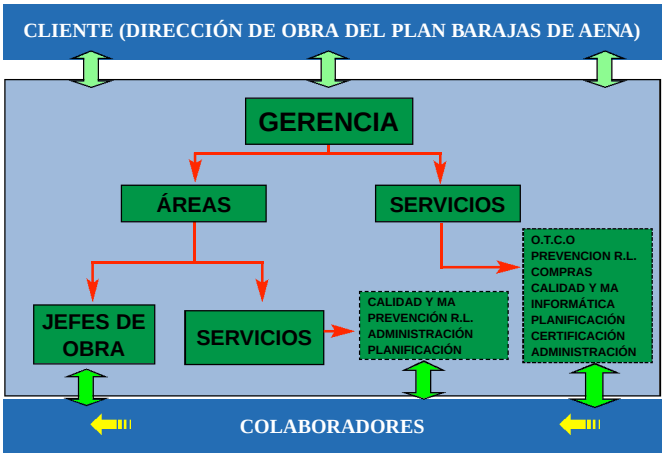


Figura 2. Metodología de trabajo.

Para adecuarse a esta circunstancia la metodología de trabajo que se aplica es la que se describe a continuación y que se representa gráficamente en la Figura 2:

- Definición del programa general de obra y de cada una de sus actividades o unidades de obra y su clasificación según proceso productivo básico, estratégico o de apoyo.

- Programación específica de las IDCs de cada unidad de obra. Los colaboradores presentan sus ofertas de colaboración, estudian la viabilidad y participan en las reuniones de consulta con la Dirección de Obra (DO). A continuación se procede a la presentación y adaptación del prototipo/ muestras para conformidad por DO y a la elaboración de las IDCs de partida con detalles constructivos a concretar/mejorar y su valoración, presentación a la DO para su revisión, desarrollo por UTE y aprobación por DO.

- Elaboración de especificaciones técnicas de producto o servicio a realizar. Los colaboradores presentan fichas técnicas y muestras de trabajo/materiales y su valoración y programación de hitos principales y secundarios.

- Generación del Plan de Aseguramiento de la Calidad–PAC, del de Vigilancia Medioambiental y de Seguridad para cada actividad, previo a su inicio y coherentes entre sí.

- Los PACs específicos para cada actividad o proceso de la obra fueron elaborados conjuntamente con los colaboradores, incorporaron la experiencia de éstos y permitieron comprobar sus capacidades. A través de su reedición se anexaron las experiencias y mejoras identificadas en el desarrollo de la propia obra. Este tipo de PAC creó valor añadido y fue y es elemento diferenciador de la UTE.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

- Entrega y verificación por DO y sus Asistencias Técnicas de los PACs por lo que el Cliente dispuso de un alto grado de conocimiento y transparencia de los procesos constructivos.

- Distribución a los Jefes de Obra de forma que concretaran el programa y acuerdos de suministro o realización de los trabajos con los colaboradores y haciéndolos coherentes a nivel de toda la obra.

- Fabricación y entrega de suministros y servicios y la realización por parte del colaborador de los controles de calidad y seguridad pertinentes, por su implicación y compromiso directo. Esto llevó asociado un volumen significativo de controles al adicionarse los controles de contraste por UTE y los realizados por la Asistencia Técnica de la DO.

- La planificación fue revisada semanalmente entre ambas partes (DO–UTE) en base a la información aportada entre otros, por los Informes mensuales de Calidad y MA de UTE.

Mediante este proceso se generaron en los 36 primeros meses en que se ejecutó el 75% de la obra, incluida la estructura de hormigón armado y tensado y la metálica, los siguientes documentos:

- 730 IDC´s (de 550 en ed.0), con 16.800 planos constructivos (de 8.600 en ed.0).

- 184 PAC´s para 74 actividades + 36 Instrucciones de Trabajo.

- PVA General + PSS, en diferentes ediciones, para cada una de las actividades identificadas.

que ayudaron en el gran trabajo de técnicos y mano de obra para cumplir los requisitos de plazo y calidad contractual. Su seguimiento permitió anticipar la influencia de unos procesos constructivos sobre otros con gran ventaja competitiva.

2. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD EN LAS ACTIVIDADES DE ESTRUCTURA

2.1. Aseguramiento de la calidad en el suministro del hormigón.

La fabricación de los 390.000 m^3 de hormigón para la estructura del NET se vio sometida a la coincidencia de los siguientes factores que afectaron al suministro de sus áridos:

- un intenso y prolongado periodo de lluvias en el invierno de 2000 a 2001 en el área de Madrid que impidió el acceso a las canteras de áridos provocando el retraso en las obras y

- la fuerte demanda de áridos consecuente a principios de marzo de 2001 a fin de recuperar, en lo posible, los plazos perdidos en las obras del área de Madrid y las altísimas producciones a satisfacer en las obras del NET, no previstas inicialmente, que provocaron que se suministraran áridos de procedencia distinta al de la cantera inicialmente prevista, al no tener ésta la capacidad que se precisaba en aquel periodo.

La correcta ejecución de la obra más emblemática del país en aquel momento conllevó la dedicación en exclusiva para los tamaños de 6 a 20 mm de una de las canteras del proveedor Readymix Asland S.A, la de caliza de Valdilecha, en la zona de Campo Real en Madrid, en la que se amplió la instalación de fabricación de áridos y los horarios de trabajo. Los tamaños de 0 a 5 mm de árido silíceo se suministraron de la gravera del río Jarama ubicada en Soto-Pajares, en Arganda, Madrid.

El suministro de cemento fue afectado igualmente por la fuerte demanda descrita anteriormente, con la problemática de las largas colas para la carga del cemento en las fábricas del entorno de Madrid. En este caso se palió la situación mediante la consideración por parte del fabricante de la obra del NET como prioritaria, con preferencia en el suministro.

Ya en la obra, siendo ésta modular en su concepción y en su construcción, de enorme tamaño y estando dividida en zonas de trabajo, dio lugar a grandes producciones diarias de hormigón (de hasta 2.000 m^3/día) y acero, con numerosos tajos a suministrar y con un alto grado de competitividad entre los equipos de dichas zonas, por lo que la planificación y coordinación en los suministros fue crítica para garantizar la continuidad, la uniformidad y el control de los trabajos y por ende su calidad. Una de las medidas que, por ejemplo, se establecieron fue la de dar prioridad, dentro de la jornada, a los hormigonados con HP-40 y HA-40 de vigas postesadas y pilares, trasladando los hormigonados de las grandes y numerosas zapatas de cimentación del edificio al final de la jornada diurna o a jornada nocturna.

Hay que destacar que debido a la dimensión del edificio y su desarrollo en planta, en cierto periodo de las obras llegaron a coincidir la actividad de cimentación y la de instalaciones.

El total compromiso entre la organización de la UTE y la del proveedor de hormigón de trabajar en la mejora de todos los aspectos afectados, con las circunstancias descritas y manteniéndose al límite en las capacidades de suministro de materiales, con el riesgo de algún fallo puntual imprevisible, permitió atender las obras con un elevado porcentaje de éxito, estableciéndose por parte de UTE el control de calidad en cada fase del proceso de fabricación, como complemento y contraste del control del proveedor [3]. Las actividades que sistemáticamente realizadas fueron:

Control en canteras de árido calizo y silíceo

- Comprobación limpieza frente, eliminación de montera y de capas de greda verdosa.

- Inspección del transporte de materia prima desde los frentes hasta la instalación (en el caso del silíceo) o hasta la machacadora (en el caso del calizo) y en acopios para verificar su tamaño homogéneo sin disgregaciones ni contaminación entre fracciones ni por arcillas.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

- Inspección de la carga del árido en bañeras, verificando que estuvieran exentas de material contaminante y que la pala cargadora estuviera limpia y no arrastrara material del terreno.

Control en la fabricación y transporte del hormigón.

- Reestudio de las fórmulas de trabajo utilizadas con un muestreo de ensayos.
- Intensificación del control a edades tempranas para verificar la evolución de las medidas adoptadas y la elaboración de un procedimiento y tabla resumen para la adopción de decisiones en obra con respecto a los elementos estructurales afectados, derivadas de los resultados de resistencia media de las tomas del hormigón a $f_{c\ 3\ días}$, $f_{c\ 7\ días}$ y $f_{c\ 28\ días}$.
- Verificación de que las tomas de probetas y su conservación se realizaba de acuerdo a normas y se cuidaba en los casos de altas y bajas temperaturas su conservación en las primeras horas.
- Realización de pruebas de homogeneidad de las amasadoras, así como de su limpieza, estado de paletas y hermetismo y verificación extraordinaria de básculas y medidores volumétricos y de la tolerancia en peso en las dosificaciones y de los tiempos de amasado.
- Intensificación de los controles de recepción de las materias primas, sobre todo áridos y su acopio en planta.
- Charla de mentalización a chóferes y entrega de las Instrucciones de Uso del Transportista de Hormigón y Mortero, de obligado cumplimiento .

2.2. Aseguramiento de la calidad del Tesado de las vigas de la estructura de hormigón.

El planteamiento arquitectónico de creación de grandes espacios diáfanos aplicado en el edificio, se materializa en la parte de la estructura de hormigón mediante la utilización intensiva de hormigones de resistencia alta tensados, tanto en sus vigas como en sus forjados de placas prefabricadas alveolares, que permiten la formación de una escuadría de un gran vano de 18 m. x 9 m. de ancho, mediante unas secciones relativamente reducidas.

Por otra parte, siendo el elemento estéticamente determinante de la Obra la obtención de un único plano de fachada y que ésta es tesada trabajando solidariamente con la estructura de hormigón y la metálica, se estableció un estricto control topográfico de manera que se respetaron las tolerancias de ejecución y que por tanto se convergió hacia la geometría final buscada.

En edificación no es habitual el trabajar con estructuras tesadas, por lo que, en el caso de las vigas postensadas, una parte del equipo de ejecución de la obra precisó de información específica sobre este método constructivo. Por otra parte la incidencia de un fallo en su ejecución, tanto en la seguridad, como en los plazos y en la moral del equipo, sería grande al poder implicar la demolición de alguna de las 300 vigas de 72 m de largo y 100 m^3 de HP-40 realizadas, fuertemente armadas, con numerosos embebidos, cajeados, rebajes y refuerzos y ejecutadas con tolerancias geométricas medidas en mm.

Por sus magnitudes (470.261 m^2), la obra estaba dividida en esta fase en 5 zonas geográficas que dispusieron, en cada una, de 1, 2 y hasta 3 equipos de ejecución de la actividad de vigas postesadas. Esto significó hasta 10 equipos de producción y control trabajando simultáneamente en sus diferentes fases y en colaboración con alguna de las tres empresas especialistas y referencia en su sector Freyssenet, BBR y Tecpresa, y ello cumpliendo la programación de obra.

Para ello se consideró necesario normalizar el proceso en todo el ámbito de la obra y unificar el lenguaje técnico a utilizar y el aspecto formal de la toma de datos de los tesados, a fin de mostrar a la Dirección de Obra, que en última instancia había de autorizar la inyección y el corte de cables, un sistema único de información.

Se planteó un ejercicio de benchmarking, es decir, de comparación para la mejora, que permitiera configurar estas metas de forma realista. Para ello se identificaron de Freyssenet, de BBR y de Tecpresa sus mejores prácticas, plasmándose en el correspondiente procedimiento técnico y de control el estándar de excelencia para la realización de la actividad.

Las referencias comunes de la norma EHE, que estaba recientemente revisada en la fase de inicio de la actividad, supuso una ventaja, aunque también cierta resistencia a la asunción de las modificaciones sobre la anterior norma.

En la elaboración del estándar de excelencia participaron todas las partes implicadas pudiendo éstas realizar sin apremios la valoración de los hallazgos, su asimilación y aceptación. Igualmente este procedimiento se sometió a los procesos de intervención por parte de la DO y sus Asistencias Técnicas tanto en el diseño del Plan de Aseguramiento para esta actividad como en el propio desarrollo de la misma, incorporado las mejoras aportadas, reduciendo las reticencias y aumentando la confianza y la coordinación en la aplicación del Plan.

Este documento fue la base de trabajo de los equipos de la UTE y el compendio de sus prácticas se plasmó en los formularios generados para el seguimiento y el control del proceso de tesado [3]:

- "Control de colocación de anclajes y vainas", verificando su estado y deformación.
- "Control del enfilado", verificando la sobrelongitud del cable y los datos y muestras para trazabilidad del acero (1.158.000 kg).
- "Control de tesado de cable" con el programa de tesado, los valores admitidos de alargamientos y de alarma, seguimiento de la fuerza aplicada, del alargamiento de cables, presión de gatos y de desclavamiento de cuñas y recorrido del pistón.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

- "Control de la inyección", verificando el tiempo desde el tesado, tipo y cantidad de cemento y aditivos, dosificación, viscosidad y presión de la inyección.

Los resultados de este conjunto de actuaciones ofrecieron resultados muy positivos ya que en la ejecución de las 300 vigas pretensadas se produjeron fallos parciales en menos del 1% de los elementos, que tuvieron una corrección relativamente sencilla y a los que se hace referencia en [3].

2.3. Calidad visual de los paramentos de hormigón

La condición de estructura de hormigón vista interior, y en menor medida, exterior, como elemento fundamental en el diseño arquitectónico para las áreas de menor carga representativa, excepto pilares corona y vigas borde, junto a los elevados volúmenes y ritmos de producción requeridos, obligó a que, desde las primeras puestas de encofrado en la cimentación, se adoptaran las medidas para obtener la adecuada calidad visual de los paramentos de hormigón. Las PATOLOGÍAS detectadas que podían afectar a esa calidad visual deseada fueron las siguientes:

1. Cambios de color entre tongadas o áreas de color gris oscuro en las juntas, en el borde del paño y entorno a los conos de espadines o aleatoriamente distribuidas en el paño.

2. Exceso de huellas de aire ocluido en la superficie de los paños.

3. Nido de abeja en la franja base del muro y en áreas aleatorias de la superficie del paño.

4. Descarnado del hormigón con aparición del árido en las juntas de encofrado.

5. Manchas amarillas en las áreas centrales de los módulos del paño.

Las actuaciones sistemáticas para evitar dichas patologías fueron las siguientes:

A. La utilización de una única planta servida de una única partida de cemento para la fabricación del hormigón de un elemento, que aportó mejor calidad visual al mismo. Esto implicó planificar según el consumo previsto y el estado de los silos de cemento.

B. Realizar el seguimiento de las partidas de áridos hasta su colocación en el tajo para anticipar su efecto sobre la calidad visual del hormigón, ya que se detectó que:

   - la presencia menor de tamaños inferiores a 0.5 mm provocaba manchas debido al enriquecimiento en cemento por la migración de los finos a lo largo del encofrado liso, y
   - la presencia menor de tamaños comprendidos entre 5 y 10 mm provocaba una discontinuidad que afectaba a la compactación y por tanto a la calidad visual del hormigón.

C. Aplicar la capa más fina posible de desencofrante y hacerlo de forma uniforme (extender con rodillo). Reducir a un máximo de 6 horas antes de la colocación la exposición al sol, las precipitaciones y el polvo de obra de los paños de encofrado de intradós con el desencofrante aplicado o proteger la superficie si el periodo era superior.

D. En el vibrado del hormigón en alzados de hasta 8 m de altura había áreas que podían quedar fuera de la influencia del vibrador al no disponer el operario de suficientes referencias para controlar la profundidad porque eran vistas cenitalmente y sin iluminación interior, por lo que se marcaron las mangueras de los vibradores cada 0.5 metros.

   Igualmente la disposición de armaduras en muros (con alzados de hasta 8 m) impedía el desplazamiento en horizontal del vibrador, sino era extrayéndolo y volviéndolo a introducir en el paño, circunstancia que requirió incorporar vibradores adicionales para esos tajos.

E. No se incorporaba el hormigón de los primeros bombazos ya que llevaba asociado gran cantidad de agua adicionada para limpieza y lubricación de la bomba.

F. Cada 2-3 puestas se realizaba el mantenimiento de las juntas del encofrado, sellando con silicona o reponiendo aquellas deterioradas, para evitar que, por falta de su estanqueidad, se produjeran fugas de lechada.

G. Las manchas amarillas eran de óxido de hierro y procedían del encofrado metálico o de la armadura. Puede existir relación entre su exposición a la lluvia y la aparición de aquellas, por lo que se protegieron los elementos ya encofrados hasta su hormigonado.

Las estructuras de hormigón vistas interiores del área más representativa del edificio son las vigas borde y los **pilares corona**. Para estos últimos, se ejecutó un pilar de muestra fuera del edificio en base al cual se establecieron las medidas para obtener la calidad visual deseada desde el primer elemento. En la Figura 3 se codifican las dichas zonas y actuaciones en la fase de encofrado y hormigonado, que son las siguientes:

Zonas tipo 1.- Proveer acceso para el correcto vibrado y así evitar coqueras y nidos de abeja.

Z t. 2.- Control especial del sellado de las juntas del encofrado en los puntos singulares indicados en el croquis para evitar coqueras y nido de abeja por pérdida de lechada a través de ellas.

Z t. 3.- Aplicación del desencofrante con rodillo en el sentido longitudinal y en todo el desarrollo del rebaje para evitar en éste, tonalidades diferentes del hormigón.

Z t. 4.- Aplicación uniforme del desencofrante en un máximo de 3 horas antes de colocar el encofrado en posición, evitando manchas por su concentración.

Z t. 5.- Aplicación generosa de desencofrante en las aristas del pilar y utilización de medios adecuados para evitar el desencofrado brusco, por el riesgo de descantillados y mordeduras.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Z t. 6.- Sellar con silicona la junta entre berenjeno y encofrado para evitar la rebaba por penetración de lechada en ella y la diferente tonalidad y aspecto rugoso del paramento a lo largo de la junta por retraso en el fraguado debido a la acumulación de desencofrante.

Z t. 7.- Sellar con mortero el arranque del pilar evitando la pérdida de lechada a través del mismo.

Z t. 8.- Acceso adecuado para el correcto hormigonado y vibrado en los extremos del pilar corona.

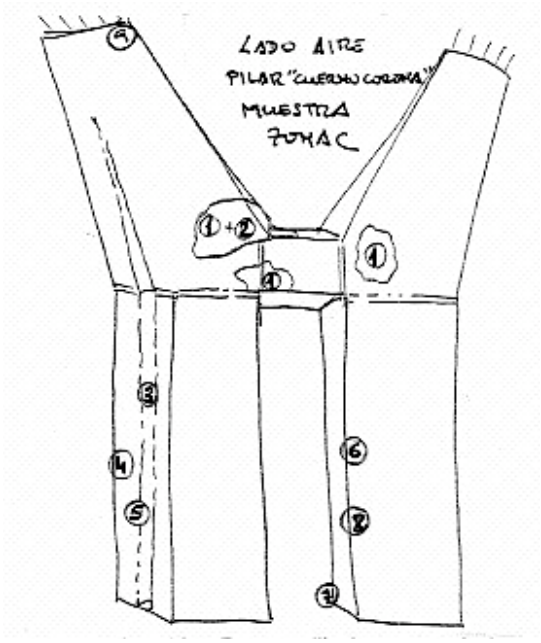


Figura 3. Pilar CORONA. Zonas con actuaciones especiales.

Se muestran ejemplos de los resultados obtenidos con el conjunto de actuaciones descritas en este apartado en las Figuras 4 a 8.

Figura 4. Pilar CORONA. Acabado de la superficie del hormigón I.

Figura 5. Pilar CORONA. Acabado de la superficie del hormigón II.

Figura 6. Viga borde. Acabado de la superficie de hormigón.

Figura 7. Estructura en zonas no públicas. Acabado de la superficie del hormigón I.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 8. Estructura en zonas no públicas. Acabado de la superficie del hormigón II.

2.4. Aseguramiento de placas alveolares prefabricadas pretensadas de forjado

El aseguramiento de la calidad en la fabricación de los 237.000 m^2 (26.750 uds.) de placas alveolares prefabricadas de hormigón pretensado HP-40 de 7,38x1,20x0,20 ó 0,30 m. para el forjado del NET se basó en las correspondientes "Autorización de Uso", el control en fábrica de los componentes y de la calidad del hormigón según la EHE y a edades tempranas para anticipar en lo posible su uso, la identificación y trazabilidad de cada placa, el riguroso control de su expedición en fábrica y de su recepción en obra.

Ya en obra, y al estar la placa diseñada estructuralmente para trabajar biapoyada en sus extremos, soportando tracciones en su cara inferior y compresiones en la superior, se establecieron instrucciones muy concretas para su descarga, acopio, manipulación y colocación, evitando someterlas a tracciones en la cara superior, especificando los criterios, maquinaria y útiles para ello.

Simultáneamente y para minimizar los riesgos tanto de seguridad en el trabajo como estructural, se controlaron en la manipulación y el acopio, tanto del proveedor en fábrica como de la UTE en obra, las fisuras que pudieran producirse, para, en su caso, proceder al rechazo de la placa. Dicho control se realizó por los calculistas y se documentó en base a criterios que, acompañados de sus correspondientes croquis, fueron dispuestos a pie de obra para todo el personal afectado.

2.5. Aseguramiento en la fabricación y montaje de estructura metálica de cubierta.

Introducción

La estructura metálica de la cubierta del NET Barajas es diseño del Estudio Lamela-Richard Rogers Partnership-Initec TPS, ha sido calculada y establecido su proceso constructivo por los Ingenieros de Terminal Barajas UTE y ha sido fabricada en taller y montada en obra por los Talleres EMESA y HORTA, que realizaron respectivamente la mitad sur y la mitad norte del edificio, con la supervisión de Empresas de Control Acreditadas.

Estos Talleres y Empresas de Control disponen de Sistemas de Aseguramiento de la Calidad basados en las Normas ISO 9000 e Instrucciones Técnicas que aportaron, particularizados para la obra, al Plan de Aseguramiento de la calidad de UTE.

La obra, siendo modular en su concepción y en su fabricación y construcción y de enorme tamaño dio lugar a grandes producciones, por lo que ha requerido un diagrama claro, flexible y bien comprendido por todos, empleando una repetición modular de gran potencia.

Para el proceso de aprendizaje en la fabricación y montaje de los componentes de mayor singularidad y complicación de diseño tales como las formas onduladas y la interface con el tensor de la fachada se experimento con prototipos en la misma obra. En este proceso los Talleres fueron libres para desarrollar sus propios métodos de trabajo.

La formas y tipologías de la de estructura metálica de cubierta se describen ampliamente en [1], [4] y [5].

Descripción del aseguramiento de la calidad en la fabricación y en el montaje.

El aseguramiento de la calidad se aplicó desde el inicio de proceso, es decir, desde la elaboración de los planos de taller, en los cuales, siguiendo las directrices de la Norma EA-95 "Estructuras de acero en edificación", se verificó que contuvieran las dimensiones necesarias, la disposición, forma y dimensiones de las uniones soldadas y atornilladas y su etapa de ejecución (en taller o en obra), el listado de perfiles y chapas con su clase de acero y marcas y los materiales a utilizar (acero laminado, tornillos ordinarios y de alta resistencia y tuercas y arandelas, pintura y material de aportación) así como las contraflechas de vigas ó elementos.

- En las actuaciones en taller y en obra se procedió a:

  – La homologación de procesos de soldaduras y soldadores, en el que se hizo un esfuerzo por parte de los talleres para renovar las existentes según normas americanas, para adecuarlas a las, en aquel momento, recientemente editadas Euronormas EN 287 y efectuadas por entidades independientes de control.

  – La recepción de materiales: tanto las chapas y perfiles, tubos, rótulas esféricas y bulones recibidos en taller, como los tornillos pretensados, tuercas y arandelas y pinturas de protección e intumescentes recibidos en obra, y material de aportación en soldaduras (electrodos, hilos, etc.) y pinturas de protección, recibidos tanto en taller como en obra, se suministraron con un documento o certificado conforme a la Euronorma EN con el que se garantizaba la realización, por parte del suministrador, de la inspección y ensayos necesarios para acreditar el cumplimiento de los requisitos de la Normas.

    Las tolerancias geométricas de suministro se verificaron en la recepción conforme a la EA 95.

    Además, en las recepciones en obra, se verificaron las "Autorizaciones de envío" y se realizó la inspección visual del 100% de la piezas recibidas para identificar las

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

posibles ralladuras y golpes sobre la pintura durante el transporte.

– Establecer y documentar los requisitos técnicos para cada tipo de unión soldada, las temperaturas de precalentamiento y entre pasadas según espesores de la chapa, tipos de electrodos según soldadura manual, automática, arco sumergido, etc. condiciones climáticas y de limpieza y sequedad de bordes, control dimensional de los componentes y chapas a unir con sus preparaciones de borde, curvaturas, etc., geométricos y de limpieza de cada cordón elemental, supervisión de la penetración completa en la zona de raíz y condiciones de regularidad de la superficie de la soldadura, según el nivel de exigencia de cada elemento y fase de ejecución.

  Igualmente se dispusieron los correspondientes procedimientos de "Taller" y "Obra" de reparación de soldaduras "No aptas".

– Establecer los procedimientos de preparación de superficies, aplicación de pinturas de protección e intumescentes, inspección y control de calidad y retoques y reparación de daños en obra.

– Establecer los procedimientos de manipulación, transporte, descarga y acopio, tanto para el chorreado y pintura como para el largo transporte desde Galicia y otros puntos hasta Madrid, en base a la seguridad máxima del personal y a la eliminación al máximo de deformaciones permanentes y ralladuras y golpes que deteriorasen la pintura. Para ello se supervisó que se emplearán ganchos, estrobos, etc., en buen estado y calzos de madera. Las zonas preferidas de amarre fueron alas, refuerzos, etc., manejando las piezas siempre que fue posible sobre sus centros de gravedad.

  Antes de expedir los materiales a obra, en caso de existir deformaciones por manejo, éstos fueron reparados por los procedimientos aprobados.

– Establecer marcas de identificación: Se aplicó para las posiciones de las piezas que transmiten esfuerzos estructurales principales la trazabilidad "física + documental" y para aquellas que son constructivas o que no transmiten esfuerzos principales, la trazabilidad "documental", de forma que para cada pieza quedó relacionado su origen y certificados de calidad con su destino final.

  Para ello, en cada una de las piezas preparadas en el taller se grabó la marca de identificación con que fue designada en los planos de taller. Para conservar la trazabilidad en el montaje, la identificación de cada elemento se registró en su localización definitiva en los planos de "Trazabilidad en montaje". Además se confeccionaron croquis de situación de las placas radiográficas con las marcas de cada pieza o conjuntos examinados.

– Establecer los criterios de inspección y control para los requisitos de ejecución, que se documentaron en sus correspondientes protocolos de inspección, donde además de su descripción y sus resultados, se adjuntaron los planos generales de taller en que se señala la zona y posición de dicha inspección.

  El programa de ENDs-ensayos no destructivos contempló inspecciones mediante partículas magnéticas, radiográficas y ultrasónicas según el tipo, localización y responsabilidad de las soldadura con sus correspondientes frecuencias y niveles de aceptación.

  Se midió en la protección el espesor de película seca y su adherencia, especialmente en las zonas parcheadas en obra y sobre soldaduras.

  Se comprobó en las uniones atornilladas el correcto asiento entre chapas y el estado de la pintura de sus superficies y, estadísticamente, que el esfuerzo de pretensado era el indicado en proyecto mediante un procedimiento específico establecido por el proyectista. Las llaves dinamométricas se sometieron a un permanente control y calibración.

  Ante la detección de algún defecto no admisible en cualquier inspección, se reparó e inspeccionó esa zona y las contiguas. Si en una misma zona, costura o empalme, se hubiesen detectado, en cualquiera de las inspecciones señaladas, dos o más defectos, se habría inspeccionado toda la zona o costura al 100%. En el caso de soldaduras, si del control efectuado en un lote se hubiera detectado más de un 5% defectuosas, se habría inspeccionado al 100% dicho lote.

• En las actuaciones específicas de fabricación en taller se procedió a:

  – Establecer los requisitos técnicos en el proceso de fabricación en taller sobre tipo de maquinaria y calificación del personal para realizar la operaciones de preparación, enderezado y conformado, trazado, marcado, corte y perforación y armado.

  – Premontar y controlar dimensionalmente en el suelo del taller el pórtico tipo antes de iniciar la fabricación en serie [4].

  – Establecer la "Autorización de salida" del taller y transporte a obra, con el listado de piezas conformes a transportar, la comprobación del marcado, del conjunto de controles de calidad realizados y la resolución de No Conformidades pendientes. Fueron remitidos a obra junto con sus correspondientes planos As-Built.

En las actuaciones específicas de montaje en obra se procedió a:

– Establecer el "Plan de montaje" de cada taller, en que se definieron los trabajos para cada zona de la cubierta, los medios humanos, auxiliares y de elevación a emplear y los denominados planos "directores de montaje" y de "implantación" del premontaje y acopios de material.

  Los sistemas de montaje utilizados fueron, en un caso, la instalación de una cimbra rodante diseñada para el montaje de la sección completa de un submódulo y en otro un premontaje en el suelo de tercios del submódulo y su elevación mediante grúas de gran tonelaje [4]. En los dos casos el progreso y las calidades estructurales y geométricas obtenidas fueron similares.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

– Se establecieron para las uniones atornilladas los requisitos técnicos y geométricos para los taladros, las chapas frontales en contacto y su protección, la posición de la tuerca respecto a la cabeza, las arandelas, la forma de apriete y el sistema de pretensado.

Este último, y por cada marca de tornillos a utilizar, se sometió a homologación para determinar la relación entre el par y sistema de apriete y la tensión de Norma en el tornillo.

Figura 9. Estructura metálica. Calidad de las soldaduras.

Figura 10. Estructura metálica. Calidad de las soldaduras y uniones atornilladas I.

Figura 11. Estructura metálica. Calidad de las soldaduras y uniones atornilladas II.

Se muestran ejemplos de los resultados obtenidos en las uniones soldadas y atornilladas con el conjunto de actuaciones descritas en las Figuras 9 a 11.

• Control geométrico en el montaje de pórticos en obra.

El elemento estéticamente determinante de la obra fue la obtención de un único plano de fachada y a éste objetivo se destinaron todos los esfuerzos, entre ellos el estricto control topográfico en las fases constructivas de la estructura metálica, de manera que se respetaron sus correspondientes tolerancias de ejecución y se convergió hacia la geometría final buscada.

Las tolerancias que fue posible admitir en la ejecución de la estructura fueron fijadas por las que, en el montaje, pudo absorber por diseño, la fachada, cumpliendo a la vez con los requisitos exigidos en proyecto desde el punto de vista estructural, estético, térmico y acústico.

Para ello se dispuso la sistemática de control de puntos geométricos principales de cada fase constructiva, para que fuese recibida en las adecuadas condiciones en la siguiente. Por otro lado se previeron medios para absorber las inevitables desviaciones de construcción, tales como calzos entre viga secundaria y principal en estructura metálica y juntas y geometría del kipper-truss en fachada. Lógicamente, según progresó el proceso constructivo, las holguras a compensar fueron más reducidas.

En el proceso constructivo, al montaje de la estructura metálica de cubierta le sigue el tesado de la fachada, acción principal en aquélla y criterio dimensionante de su rigidez, con los consiguientes movimientos horizontales y verticales de sus puntos de conexión con la fachada. Por tanto, la geometría con la que se montó la estructura de cubierta no se correspondió con la geometría final, sino con la suma de [geometría final + contraflechas], considerando la deformación por pesos propios despreciable con relación al resto. Los valores de las contraflechas verticales y horizontales en vigas principales se ajustaron de modo experimental en el primer módulo que se ejecutó, así como el valor de la rigidez del conjunto estructura metálica + estructura de hormigón.

En base a lo anterior los puntos geométricos principales fueron el anclaje superior en la viga principal e inferior en la viga borde de hormigón del Kipper-Truss, para lo que se aplicó el control en el posicionamiento de los puntos que se describen en la Figuras 12 y 13.

El control geométrico que se aplicó sobre ellos en el proceso de montaje de los pórticos fue:

– Pilares en “V”: (ptos. 3 y 4): se realizaron sucesivas comprobaciones de los dos puntos extremos de los dos pilares de cada eje para su mejor posicionamiento en el espacio.

– Viga Principal (ptos. 2 y 5): en el montaje de un submódulo, después de colocado su parte central y en diferen-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Localización del punto de control	Ref.
Unión con pilar "Y" en el lado tierra	1
Unión con kipper truss en el lado tierra	2
Unión con pilar "V" en el lado tierra	3
Unión con pilar "V" en el lado aire	4
Unión con kipper truss en el lado aire	5
Unión con pilar "Y" en el lado aire	6

Figura 12. Cuadro de puntos de posicionamiento en X, Y y Z de la estructura metálica.

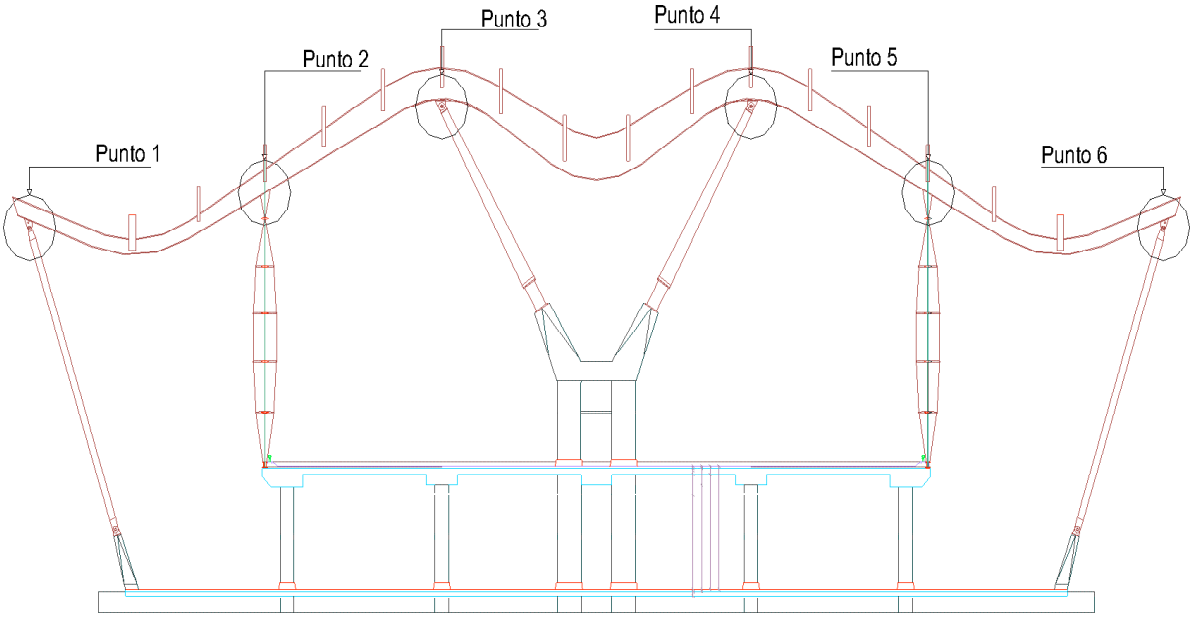


Figura 13. Puntos de posicionamiento en sección tipo de dique de la estructura metálica.

tes situaciones de equilibrio (mismo número de piezas montadas por lado aire que por lado tierra), se colocó la plomada láser cenit-nadir en el punto de intersección de su eje con el eje del muro cortina, que fue guía para situar el conjunto en su posición y se realizaron controles topográficos para registro de coordenadas y comprobación del nivel.

– Pilares en "Y" (ptos. 1 y 6): Se comprobó el arranque ya que está obligado por el montaje de la propia estructura.

A su vez se controló que cada punto, con respecto a la línea imaginaria que une a los puntos homónimos de las dos vigas contiguas, tuviera unas desviaciones en las direcciones X, Y y Z menores a unos determinados valores medidos en mm.

El grado de precisión obtenido en el proceso de montaje, dadas las dimensiones y diseño de la estructura, fue muy apreciable, pero dado que en el tesado y posterior transmisión de cargas al kipper-truss la carga debió aplicarse justo en la vertical del alma de la viga principal y con una diferencia apreciable de ±10mm en la posición relativa con la conexión al hormigón, en los puntos en que se superaba esta diferencia, se establecieron las siguientes actuaciones aplicables en el EJE X (longitudinal del dique-SUR-NORTE), EJE Y (perpendicular a la fachada - ESTE-OESTE) y EJE Z:

– Las desviaciones menores existentes se corrigieron, en el anclaje superior, alargando y acortando el sistema de barras del Kipper Truss y en la placa de anclaje inferior mediante la diferencia entre el Φ del taladro y el Φ del perno. Los taladros de las placas de anclaje superiores carecieron de holgura.

– Las desviaciones mayores se corrigieron actuando en el anclaje superior por medio de calzos en la vigas principales o en la placa inferior sobre los taladros, definiendo por los calculistas, según los posibles espesores, los márgenes posibles de sus desplazamientos.

– En el eje Z, en el anclaje inferior, el diseño de la placa permite absorber desviaciones menores. Las desviaciones mayores se corrigieron por medio de retacados.

Por último, previo al tesado de la fachada, y para el correspondiente "módulo" de estructura metálica de cubierta (conjunto de 8 vigas principales consecutivas entre 2 juntas de dilatación) fue precisa la cumplimentación del formulario

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

"Estadillo de aceptación del montaje" que acreditó que se habían cumplido los requisitos necesarios para proceder a realizar dicha actividad.

Se muestran ejemplos de los resultados obtenidos con el conjunto de actuaciones descritas en este apartado en las Figuras 14 y 15.

Figura 14. Control geométrico en el montaje.

3. RESULTADOS

– Especialistas del renombre internacional de Richard Rogers declaran que "la calidad aportada por la industria y la mano de obra españolas y la relación precio tiempo son cuestiones que han sorprendido gratamente" por su comparación con las ampliaciones de los aeropuertos T5 de Heathrow, Schipol, Frankfort u Osaka.

– Trabajando en equipo arquitectos e ingenieros civiles, aeronáuticos e industriales de AENA, UTE y colaboradores, se han aplicado innovaciones tecnológicas, aportando valor añadido y aspecto diferenciador en esta obra. Entre ellas:

- El desarrollo del método constructivo de muro-cortina tesado, flexible y estanco, realizado por ingenieros de UTE y su diseño de detalle y ejecución realizado por FOLCRÁ.
- La disposición de carros de encofrado para vigas pretensadas por PERI.
- Cimbra rodante para montaje de estructura metálica de cubierta realizada por HORTA.
- Soporte tecnológico y humano para coordinación de interfaces con otros expedientes de Plan Barajas tales como SATE y APM.

Figura 15. Alineación de la fachada obtenida mediante el control geométrico en el montaje.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Las buenas prácticas y las innovaciones tecnológicas han beneficiado al resto de Plan Barajas por su aplicabilidad y han devuelto a la sociedad sistemas de trabajo altamente especializados.

REFERENCIAS

[1] Lamela, Carlos; Moya, Paz: "Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Gómez Hermoso, Jesús: "Relación entre el proyecto, la ingeniería de detalle de construcción y la ejecución del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Gómez Hermoso, Jesús; Gutiérrez Bueno, Manuel; Moreno Puertollano, Antonio: "Nuevo Edificio Terminal. Singularidades, incidencias y soluciones en la ejecución de la obra". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: "Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[5] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: "Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[6] *"Diseño, planificación, ejecución, control y coordinación de la gestión integral de colaboradores en el proyecto del NET dentro del Plan Barajas"*. TERMINAL BARAJAS UTE. IV Premio a la Excelencia y Mejores Prácticas de AENA. Modalidad de Proyectos de Infraestructuras.2004.

[7] Nuevo Galeazo, Manuel: *"Presente y futuro de la calidad en la construcción"*. ACCIONA S.A. VII Congreso Español de la Calidad. 1998.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Nuevo Edificio Terminal. Singularidades, incidencias y soluciones en la ejecución de la obra

New Terminal Building. Singularities, incidences and solutions in construction

Jesús Gómez Hermoso
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FCC Construcción

Manuel Gutiérrez Bueno
Perito Industrial. Ferrovial-Agromán

Antonio Moreno Puertollano
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FCC Construcción

RESUMEN

En este artículo se describe, inicialmente y de forma breve, el planteamiento de la obra, la programación de los trabajos y el procedimiento de su desarrollo desde el punto de vista del seguimiento de la misma por parte de la Oficina Técnica del Constructor en Obra que Terminal Barajas UTE puso a disposición de la misma.

A continuación se detallan algunos elementos singulares que afectan de forma directa a la construcción de la estructura del edificio, como son los materiales empleados, la cimentación, los pilares, las vigas de hormigón postensado y los forjados.

Finalmente, se describen algunos procedimientos constructivos especiales y correcciones de errores durante la ejecución de la obra.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, estructura, hormigón, control, pretensado, edificación.

ABSTRACT

In this paper building planning, scheme of construction work and development proceeding are initialy and briefly described from the point of view of the Constructor Technical Office that Terminal Barajas UTE placed at its disposal.

Some singular elements that directly affect the building structural construction are described successively, such as building materials, foundations, columns, post-stressed concrete beams and slabs.

Finally some of the special building proceedings and error corrections during the work are also described.

Key words: *Airport, Barajas, structure, concrete, control, prestressing, building.*

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo, dentro del conjunto de los que, recogidos en este número monográfico de Hormigón y Acero, describen los edificios que constituyen la Nueva Área Terminal del Aeropuerto de Madrid-Barajas, se mostrarán algunos aspectos de la ejecución del Nuevo Edificio Terminal (NET), así como el seguimiento del proyecto y de la obra por parte de la Oficina Técnica del Constructor en Obra (OTCO), que en la misma dispuso Terminal Barajas UTE, empresa constructora formada por ACS, FCC Construcción, Ferrovial-Agromán, NECSO y SACYR.

El Nuevo Edificio Terminal está compuesto por tres volúmenes paralelos, orientados en el sentido Sur-Norte, con tres plantas sobre el nivel de rasante de la plataforma. Bajo este nivel los tres volúmenes se unen en el –1, reduciéndose su superficie según se desciende hasta el nivel –3. Los citados tres volúmenes principales se encuentran separados por los cañones, que son espacios vacíos en toda su altura (sobre la rasante de plataforma). La descripción completa se encontrará más detallada en [7].

A los citados tres volúmenes es preciso añadir, para completar la descripción arquitectónica, la Dársena, zona que

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

recoge el acceso desde el exterior del área aeroportuaria, tanto mediante vehículos automóviles como ferroviarios.

2. PLANTEAMIENTO DE LA OBRA

El planteamiento de la obra, desde el punto de vista del seguimiento técnico de la ejecución de la misma estaba condicionado a la existencia de una Oficina Técnica del Constructor en Obra (OTCO) para desarrollar la Ingeniería de Detalle de Construcción. El equipo técnico dispuesto desarrolló una parte del proyecto de forma directa y coordinó el desarrollo de otras partes, ejecutadas por empresas de ingeniería contratadas al efecto.

Los mismos técnicos de la OTCO que habían desarrollado los trabajos de proyecto, realizaban el seguimiento de la parte por ellos llevada a cabo, de tal forma que su conocimiento de la misma era más profundo. Este sistema, que tenía la evidente ventaja del conocimiento, tenía también sus inconvenientes, siendo el principal de ellos que el desarrollo de un proyecto tan amplio llevaba a tener que realizar el seguimiento de la ejecución de una fase del edificio cuando aún se estaban proyectando otras, con las consiguientes dificultades de simultanear los trabajos.

Por otra parte, la empresa constructora contaba también con un Departamento de Calidad junto al que se desarrollaban labores de Control de la Ejecución, descritas en [8].

La Dirección de Obra también disponía de unos Equipos de Gestión de Control de Obra (EGCO) que lo llevaban a cabo tanto en aspectos puramente técnicos constructivos, como de calidad de materiales, económicos y de planificación.

3. PROGRAMACIÓN DE TRABAJOS

Los trabajos relacionados con el seguimiento de la obra atendían, fundamentalmente, los siguientes aspectos:

– Desarrollo de procesos constructivos.

– Modificación de elementos constructivos durante la ejecución por solicitud de la Propiedad, del equipo de Arquitectos e Ingenieros colaboradores de ésta o de los técnicos de la Empresa Constructora.

– Análisis de defectos de ejecución y planteamiento de las soluciones correctoras.

El primero se asociaba al desarrollo de la IDC, con lo que la programación se encuentra ligada a la de ésta.

El segundo de estos aspectos planteaba muy poco margen de tiempo para su realización, ya que sobre el Proyecto Licitado y tras el desarrollo de la Ingeniería de Detalle de Construcción era cuando se planteaban estas modificaciones que afectaban a la ejecución de la obra y, por tanto, a su seguimiento. Por este motivo la programación previa no era posible, siendo necesaria su atención inmediata para evitar retrasos en obra.

El tercero, dependía de la trascendencia de los defectos, normalmente puestos de manifiesto a través de “no conformidades” planteadas por el EGCO. Si los defectos eran graves y urgentes debían tener una resolución inmediata. Si eran de un orden menor se realizaba una planificación en el tiempo que permitiera programar las soluciones a adoptar por unos, analizar por otros y, finalmente, aprobar por la Dirección de Obra.

4. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

El seguimiento técnico de la obra se encontraba englobado dentro de las actividades de la OTCO. El procedimiento de trabajo, teniendo en cuenta la programación descrita en el punto anterior, se puede dividir en los siguientes casos:

- **Procedimientos constructivos.** Se desarrollaban por parte de los técnicos de la OTCO, se contrataban a una Empresa de Ingeniería exterior, o se recibía el apoyo de los Servicios Técnicos de las empresas que constituían la UTE. Posteriormente se presentaban a la Dirección de Obra quien, tras consulta con sus equipos asesores, aprobaba o proponía alguna modificación.

- **Modificaciones de la IDC** para su ejecución durante el desarrollo de la obra. Al ser, normalmente, modificaciones menores se resolvían de forma inmediata por parte de los técnicos de la OTCO, con consultas y aprobación o corrección rápida por parte de la Dirección de obra.

- **Resolución de “no conformidades”**. Éstas se analizaban por parte de la OTCO o del Departamento de Calidad de la constructora y se proponía una solución. El EGCO la analizaba, dando su aprobación o solicitando ampliación de información sobre la misma, o su modificación. Se repetía el proceso hasta que se obtenía una solución final que corrigiera el defecto planteado.

5. ASPECTOS SINGULARES

5.1. Materiales

Los materiales empleados en la estructura de hormigón, en la estructura metálica de cubierta y en las estructuras metálicas interiores han sido los siguientes:

Hormigón:

– Zapatas	HA-30/B/40/IIa
– Pilotes	HA-30/F/20/IIa
– Pantallas	HA-30/F/20/IIa
– Muros	HA-30/B/40/IIa
– Pilares bajo rasante	HA-40/B/20/I
– Pilares sobre rasante	HP-40/F/12/I
– Vigas armadas y pretensadas:	HP-40/F/20/I
– Vigas de borde	HP-40/F/12/IIa
– Forjado de losa armada	HP-40/F/20/I
– Placas prefabricadas	HP-40/B/20/I

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Acero:

- B500S acero corrugado en zapatas, muros, pilares y vigas
- Y 1860 S7 15.2, acero activo en vigas
- S-275 ó S-355, en sus distintas modalidades de JR, JO ó J2G3.
- S-355 J2G3 bonificado en tirantes de prepasarelas.
- Tornillos de alta resistencia, calidad 10.9 ó 8.8.

5.2. Cimentación

5.2.1. Descripción

La cimentación del edificio es, fundamentalmente, directa mediante zapatas aisladas y corridas. Los muros perimetrales que rodean las plantas sótano del edificio están ejecutados "in situ", con encofrado a dos caras y cimentación directa mediante zapatas corridas.

Los pilares interiores del edificio tienen también una cimentación directa, en este caso sobre zapatas aisladas (Figura 1). En algunas zonas muy localizadas, debido a la acumulación de cargas puntuales en un espacio reducido se han realizado losas de hormigón armado.

En la parte central del edificio, en espacios de cimentación de Facturador, Procesador y Dique se ha realizado una cimentación profunda con pilotes de 1,25 m de diámetro.

Los pilotes bajo pilares se encuentran agrupados en encepados de 2, 3 y 4 pilotes, mientras que los que sirven de cimentación de muros se agrupan en dos alineaciones, una bajo la zarpa del trasdós y otra bajo la del intradós.

5.2.2. Ensayos sobre pilotes

Además de los ensayos de control de materiales recogidos en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, tanto mediante la rotura a compresión de probetas de hormigón como los que se realizan sobre las probetas de acero pasivo, para llevar a cabo un control más riguroso de la calidad de los pilotes se han realizado dos tipos de ensayos de integridad estructural: sónico (o de impedancia mecánica) y ultrasónico (o "crosshole").

– *Método sónico*

En este ensayo, que se ha planteado sobre el 80% de los pilotes ejecutados en la obra, se aplica un golpe de martillo sobre la parte superior del pilote, que envía una onda de compresión a lo largo del fuste, reflejándose por las discontinuidades del pilote, por su punta o por los cambios de sección o variaciones del terreno que lo rodea. Los movimientos de la cabeza del pilote son captados por un acelerómetro, siendo la señal convertida en medida de velocidad. El análisis de los gráficos obtenidos permite conocer la integridad estructural del pilote.

Los pilotes no requieren ninguna preparación especial para la realización del ensayo. Sin embargo, sí es importante que se encuentren descabezados en el momento de la ejecución de este

Figura 1. Vista general de cimentación.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

ensayo, evitando así las irregularidades que pueda ocasionar la posible contaminación de su parte superior. También es necesario que las pruebas se lleven a cabo transcurrida una semana desde el hormigonado de los mismos, con el objetivo de que el material haya alcanzado el endurecimiento y módulo de elasticidad que permita una adecuada propagación de la onda.

– *Método ultrasónico ("crosshole")*

Este método, que se ha aplicado sobre el 10% de los pilotes ejecutados en la obra, se basa en registrar el tiempo que tarda una onda ultrasónica en propagarse desde un emisor a un receptor que se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos situados en el interior del pilote. En el caso de existir defectos en el camino de las ondas (inclusiones de tierra, coqueras u otros) que hagan alargar el tiempo de recorrido, en el gráfico del ensayo se aprecia la variación y la profundidad a que se ha producido.

Los tubos, que se fijan a la armadura del pilote antes del hormigonado, son de acero, con un diámetro de 50 mm, realizándose los empalmes con manguitos roscados y cerrando herméticamente mediante tapones, también roscados, los extremos inferior (durante todo el proceso) y superior (hasta el momento de desarrollo del ensayo). Teniendo en cuenta que el diámetro de los pilotes ha sido de 1250 mm se han dispuesto cuatro tubos.

Como resultado de estos ensayos se han detectado algunas irregularidades en la continuidad del hormigón dispuesto en algunos pilotes. En estos casos se han realizado pruebas posteriores, como perforación de sondeos en los mismos, obteniéndose en todos los casos resultados satisfactorios, con mínimas pérdidas de sección que no ocasionaban reducción significativa de la seguridad estructural.

5.3. Pilares

La tipología de los pilares de hormigón existentes en la obra es muy variada. Desde los circulares hasta los cuadrados o rectangulares dobles en los pórticos centrales de cada una de las tres unidades del edificio, pasando por los rectangulares dobles que finalizaban bajo la cubierta en una bifurcación en elementos troncocónicos inclinados.

Las singularidades que presentan estos pilares son, básicamente dos: su elevada altura y la forma singular de su sección, que llevó a unos encofrados especiales.

Además de las medidas especiales de hormigonado desde una cierta altura, hubo que cuidar especialmente el hormigonado de los elementos superiores inclinados (Figura 2), sobre todo porque su elevada densidad de armadura hacía difícil conseguir un acabado superficial correcto para la calidad de hormigón visto que se debía obtener.

5.4. Vigas

Las vigas postesadas tienen, salvo excepciones, una longitud de 72m (entre juntas de dilatación) dividida en cuatro

Figura 2. Pilares dobles.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 3. Anclajes en viga tipo de hormigón.

vanos de 18 m de luz (Figura 3). La sección transversal tiene un ancho de 1,80 m y un canto de 90 cm para niveles bajo rasante y 80 cm para sobre rasante. Todos los anclajes son activos y se sitúan en unos cajeados fácilmente accesibles situados en las juntas de dilatación.

La armadura activa está formada por 2 tendones de 15 cordones de 0.6“ de acero Y 1860 S7 15.2, 140 mm^2 de área de cordón con carga de rotura de 266 KN/cordón, con un trazado de altura variable a lo largo de la viga. Se han tesado así más de 1.100 t de acero, en 32.000 m de viga.

5.5. Postesado de vigas

El tesado se realizó primeramente en un extremo de la viga y seguidamente se retesó en el opuesto con una fuerza de tesado en ambos extremos de 2990 KN. La presión de tesado se aplicaba en escalones de 50 bares hasta una presión de aproximadamente 440 bares.

En este proceso de tesado y retesado se controlaba, para cada tendón, el alargamiento real producido en cada escalón de carga de 100 bares, comprobando que no difiriera con el teóricamente previsto en más del 10% del producido en escalones anteriores del mismo tendón (así como de otros de igual trazado y longitud). Se tenía en cuenta la penetración de cuña así como el alargamiento debido a la sobrelongitud del gato (Figura 4).

TERMINAL BARAJAS UTE	Obra: **NET Barajas**	EXPEDIENTE: 1136 / 99	PAC
ET 24 Edic. form	PAC-IDC 4 - Estructura de hormigón, forjados y losas PAC-IDC 4.3: VIGAS DE HORMIGÓN H. POSTESADO **CONTROL DE TESADO DE CABLE** **PROGRAMA DE TESADO VIGA VP-C2-1**		Edic.: 02 Fecha: 27/06/01 Página: 1 de 3

PROVEEDOR QUE REALIZA EL TESADO: **BBR** ☐	**FREYSSINET** ☐	**TECPRESA** ☐	
VIGA: **VP-C2-1**	ZONA: **C2**		EJES: **TE 5n-10**
CABLE: Izquierdo ☐ Derecho ☒ (Posición vista desde ext. 1 al ext. 2)	COMPOSICIÓN: **15 T 0.6”**	EXTREMO 1: Posición Norte ☐ Sur ☐	
GATO TIPO: CC-500 – 3763	CENTRAL: P-6 nº 578	MANÓMETRO:	CONSTANTE DE TESADO C: Kgs/bar

	EXTREMO 1			
	Ft	Fa	ΔI1	V.A.
TESADO	2990	2990	396	416 376

	EXTREMO 2			
	Ft	Fa	ΔI2	V.A.
RETESADO	2990	2990	55	58 52

A6 B6 C1 D1

ΔI1+ ΔI2	V. ADMITIDO
451	**Máx. 474** **Min. 428**

Ft: Fuerza max. de tesado (KN) **Fa**: Fuerza anclaje (KN) **ΔI**: Alargamiento teórico (mm.) **V.A.** Valor admitido (mm)

EXTREMO	FUERZA (Tm)		PRESIÓN (bar)		PRESIÓN DESCLAV. CUÑAS	RECORRIDO PISTÓN (mm)		ALARGAMIENTO (mm)		OBSERVACIONES
	DE:	HASTA:	DE :	HASTA:		DE:	HASTA:	PARCIAL	TOTAL	
1			**0**	**50**		**0**				
			50	**100**						
			100	**200**						
			200	**300**						
			300	**400**						
			400	**420**						
			420	**441**						
					Blocaje					
2			**0**	**50**		**0**				
			50	**100**						
			100	**200**						
			200	**300**						
			300	**400**						
			400	**441**						
					Blocaje					

Realizado por: Fecha: Fdo:

Validado por:

Figura 4. Hoja de control de tesado.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 5. Forjado de placa alveolar.

Finalmente se comparaba el alargamiento total real con el que se indica en los planos para cada viga, comprobando que se cumpliera el Artículo 67.8.4 de la Instrucción EHE, así como la limitación de la desviación del alargamiento respecto del estimado, que no debe superar el 5% por defecto ni el 10 % por exceso.

En el caso de que esto no se cumpliese se recalculaba el alargamiento de cada tendón utilizando el módulo de elasticidad y el área reales (ambos datos disponibles por los certificados de características del material) verificándose que se cumplieran las condiciones expuestas en el párrafo anterior.

Tras estas comprobaciones y la validación de la Asistencia Técnica de la Dirección de Obra se procedía al corte de tendones e inyección de las vainas. Debido a que las dimensiones del cajetín de tesado eran reducidas era necesaria la realización del corte previo al tesado del tramo siguiente.

5.6. Forjados

La elección de la tipología de forjados se determinaba, incluso desde Proyecto de Licitación, en función de las sobrecargas de uso, así como de la mayor o menor necesidad o conocimiento de apertura de huecos. Estos tipos han sido los siguientes:

– Losas macizas in situ:

  Para grandes valores de sobrecarga así como para zonas de grandes huecos conocidos en el momento de la redacción del proyecto constructivo.

– Placas alveolares:

  Para sobrecargas de 8 ó 10 KN/m^2. Estas placas conseguían el aligeramiento del peso propio del forjado y permitían la realización de pequeños taladros para paso de instalaciones (haciendo coincidir la posición de éstos con alguno de los alvéolos). Por la necesidad de colgar cargas de SATE (Sistema Automatizado de Transporte de Equipajes) todas las placas se diseñaron, desde su fabricación, con el eje de simetría sin tendones de acero y macizado (Figura 5).

– Placas pi:

  Para sobrecargas de 8 ó 10 KN/m^2. Estas placas tienen una sección transversal en forma de letra π, con dos nervios laterales y una losa central de modo que se consigue el aligeramiento del peso propio del forjado así como la apertura a posteriori de huecos de forma más sencilla que las placas alveolares ya que los tendones se concentran en sólo dos nervios laterales, que, en la apertura del hueco (con un ancho de hasta 0,58 m) se conservan.

– Placas Farlap (Figura 11):

  Para sobrecargas de 1 KN/m^2 en formación de techos. Estas placas consisten en unas prelosas formadas por una suela y unos nervios sobre los que se colocan bovedillas de porexpán. Se consigue el aligeramiento del peso propio del forjado, así como la fácil realización de pequeños taladros o huecos de instalaciones, haciendo coincidir la posición de éstos con alguna de las suelas, según se describe en el apartado correspondiente.

6. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS ESPECIALES

En esta obra se han desarrollado tres procesos constructivos generales muy específicos para el conjunto de estructuras que se han ejecutado:

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

– Construcción de las vigas "in situ" de hormigón pretensado con armadura postesa.

– Montaje de las vigas principales, correas y arriostramiento de la estructura de cubierta.

– Montaje y tesado de la estructura del muro-cortina del Dique.

Estos tres procesos se describen, respectivamente, en [9], [10] y [11]. Sin embargo, la construcción de otros elementos, así como algunos esquemas secundarios, pero necesarios, para la realización de los tres procesos anteriores, han requerido procedimientos constructivos que a continuación se explican.

6.1. Movimientos horizontales y de elevación de grúas móviles sobre la estructura de hormigón del edificio

La imposibilidad de utilizar grúas móviles, ubicadas en el exterior del edificio, para el montaje de la estructura metálica de cubierta, debido tanto a las distancias a que éstas pueden posicionarse como al peso de los conjuntos a montar (los más livianos suponen alrededor de 35 t), junto a la falta de capacidad portante del forjado del Nivel +2 para permitir el tránsito de dichas grúas sobre el mismo, obligó a diseñar un procedimiento que, además de permitir el montaje, garantizara la seguridad durante el mismo y permitiera su realización con la requerida celeridad.

El sistema ideado consiste en disponer dos líneas con doble carril cada una, de modo que cada par de carriles se sitúan sobre las vigas de dos alineaciones sucesivas. Cada una de estas líneas se posicionan en los ejes que delimitan el vano central de dos cuerpos del Terminal: Procesador y Facturador.

El equipo completo consta de tres carretones autónomos que portan los motores necesarios para su desplazamiento y descansan sobre cuatro bogies separados 9,0 m en sentido transversal (separación entre ejes de vigas), y 18,0 m en el longitudinal (separación entre pilares). De este modo se garantiza que las cargas de las grúas en vacío se transmiten a las vigas sin afectar al forjado, y cuando se van a izar las piezas los bogies se sitúan coincidiendo con ejes de pilares, por lo que las mayores cargas se transmiten directamente a éstos, sin afectar a las vigas.

El montaje se inició en un cuerpo del edificio, el Facturador. Las necesidades de plazo obligaron a disponer cuatro equipos completos, lo que permitió partir desde el eje de simetría hacia ambos extremos, simultáneamente. Finalizado el montaje de la estructura metálica de cubierta, en este cuerpo, los equipos se trasladaron al Procesador, donde se empleó el mismo procedimiento para el montaje de la cubierta.

Adicionalmente, se dispusieron estructuras metálicas, también desplazables, para apoyo provisional de los conjuntos extremos (hasta completar los nudos de unión entre estos y el central), en los que se ubicaban las necesarias plataformas de trabajo. Se adjunta dibujo en perspectiva (Figura 6) facilitado por el Departamento de Construcciones Metálicas de EMESA, responsables del desarrollo del sistema.

El carretón interior, no representado en el croquis que se acompaña, porta una grúa de 40 t de capacidad de carga, destinada al montaje posterior de piezas complementarias. El siguiente carretón, porta una grúa de 160 t, destinada a reco-

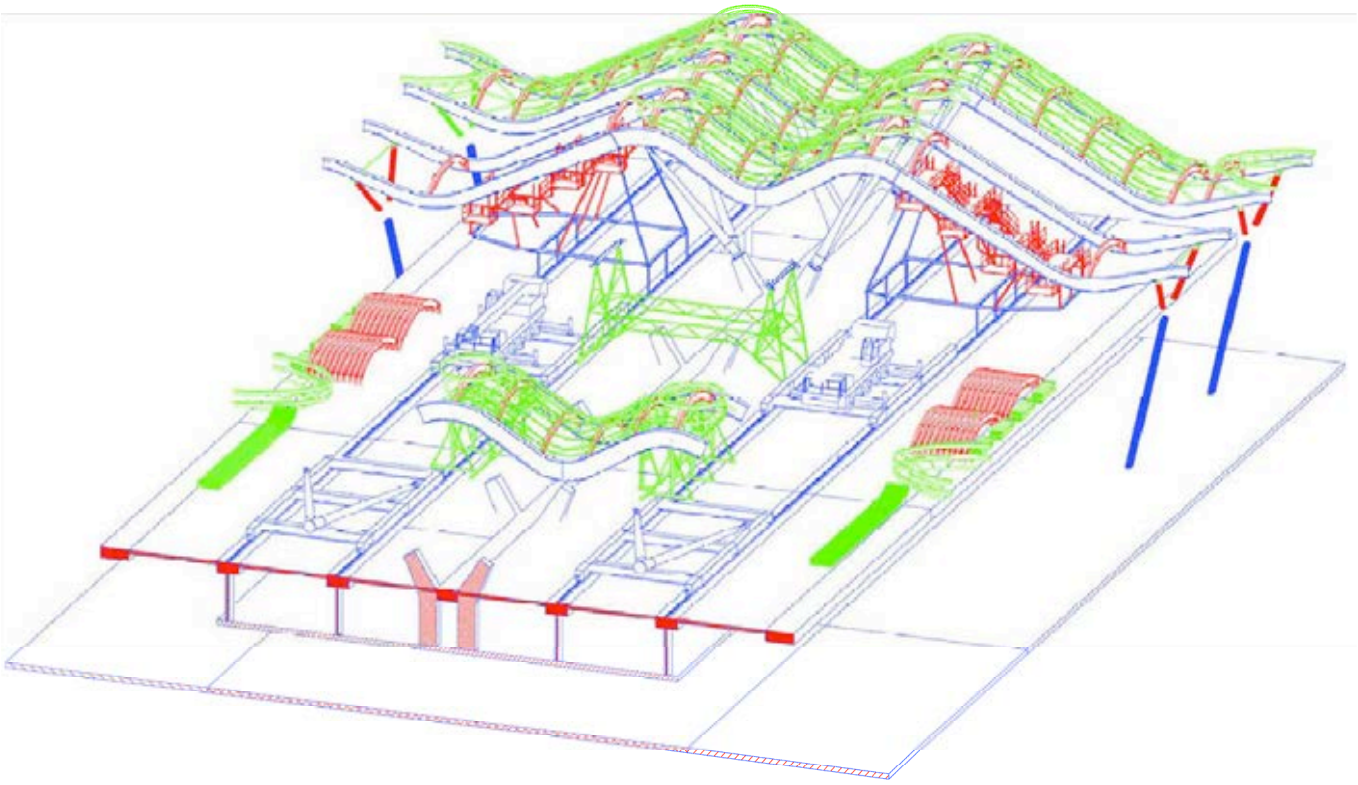


Figura 6. Montaje de estructura metálica de cubierta.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 7. Carretín de grúa para montaje de estructura metálica.

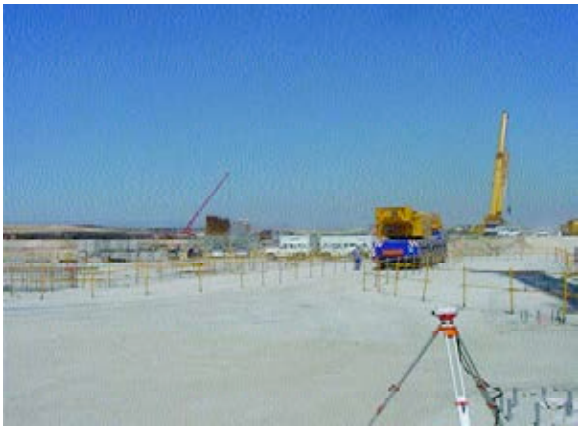


Figura 9. Recorrido de maquinaria en nivel 0.

ger las piezas aportadas por el tercer carretón y posicionarlas en su lugar definitivo. Por último, el tercero, circula entre esta última grúa y el extremo del forjado y se destina al acarreo de las piezas a montar (Figura 7).

El conjunto está formado por cuatro equipos, lo que permite el montaje simultáneo en ambos cuerpos del edificio, avanzando desde el centro hacia los extremos, en cada uno de ellos.

Adicionalmente, se adecuaron cuatro zonas para situar una grúa con capacidad de hasta 560 t, encargada del izado inicial de los equipos y la bajada final de los mismos, concluido el montaje, operación que se lleva a cabo desde el forjado del Nivel 0. Durante el montaje, en estos mismos puntos, se posicionaron sendas grúas, de 260 t de capacidad, encargadas de suministrar las piezas a montar desde este nivel hasta el +2 (Figura 8).

Figura 8. Izado de grúas al nivel +2.

Por estar previsto el forjado del Nivel 0 para carga de tráfico, no existía dificultad para permitir el paso, tanto de las grúas necesarias como del trailer encargado del transporte del material desde el taller. Las mayores cargas que representan el posicionado de las grúas y el izado de material, exigieron un apeo del forjado hasta cimentación.

Durante el izado, además de las medidas de seguridad establecidas con carácter general, se estacionó un aparato con objeto de medir las deformaciones y detener las operaciones en caso de superar aquéllas los valores previstos.

Otro aspecto importante, en el que se ha requerido la actuación de la Oficina Técnica, es la evaluación y autorización de paso de los innumerables equipos que resultan necesarios en una obra de estas proporciones; en ocasiones, fue preciso fijar el recorrido o las disposiciones adicionales que resultó necesario adoptar (Figura 9). La variedad de maquinaria empleada abarca desde elementos relativamente livianos con carga máxima de 2 ó 3 t, carretillas auto-elevadoras o cestas para trabajo en altura, toros para transporte de materiales de hasta 13,0 t de carga total, cubas de hormigón para transportar hasta 9,0 m^3, transportes pesados para aporte de vigas de estructuras metálicas y puentes, grúas móviles para montaje de estructuras, puentes y desmontaje de grúas- torre, etc.

Como ejemplo de caso extremo de estas tareas, controlar la circulación de dos grúas móviles para 1600 t de capacidad y tara total de 650 t cada una.

6.2. Realización de huecos en forjados

El paso de conductos de las diferentes instalaciones del edificio a través de los forjados hace necesario, en gran cantidad de casos, la ejecución a posteriori de huecos en los mismos debido a nuevas necesidades o a que se construyeron los forjados cuando en alguna zona las instalaciones aún no estaban totalmente definidas.

En aquellos forjados donde se conocía la posterior necesidad de apertura de huecos, se decidió la sustitución de placas alveolares por placas pi.

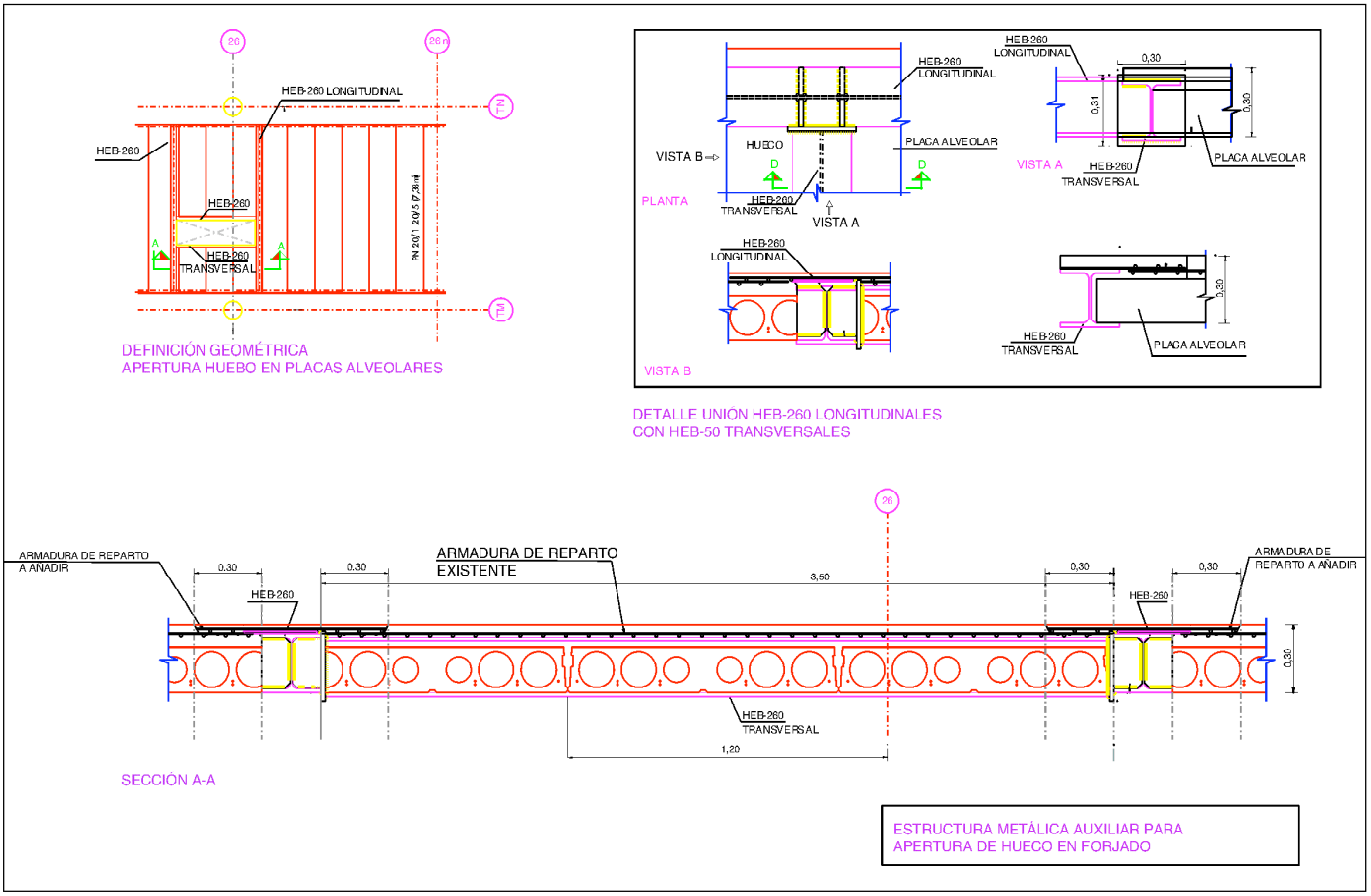
En el caso de placas alveolares se distinguían varios casos, según el ancho de hueco a realizar:

– Hueco de dimensiones menores que el ancho de placa (1,20 m).

  Se estudia el momento y cortante último que tiene la placa resultante al eliminar un cierto número de nervios y se comprueba que sean mayores que los que produce la "carga adicional" (peso de pavimento + sobrecarga de uso). También se estudia que las deformaciones sean admisibles.

– Hueco de dimensión tal que afecta a una placa (cortándola enteramente) o afecta a dos placas (no cortándolas enteramente).

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025



Fgura 10. Estructura metálica auxiliar para apertura de hueco en forjado.

En este caso se coloca una "percha" metálica con forma de Ω invertida que da apoyo a la placa cortada. Esta percha se cuelga de las placas adyacentes. Adicionalmente se realiza, sobre esta percha, un zuncho de hormigón de remate de la placa cortada.

– Hueco de dimensiones tal que se corta enteramente más de una placa (Figura 10).

  En este caso se hace necesario la realización de una estructura metálica auxiliar tipo bastidor, que recoja debidamente el apoyo de la/s placa/s cortada/s.

  Esta estructura está formada por HEBs soldadas formando en planta una hache. Lógicamente, esta estructura se calcula para el peso propio del forjado más la "carga adicional" y se sitúa, en general, embebida en el canto del forjado. Sin embargo, en el caso de no existir instalaciones o limitaciones de gálibo, se dispone bajo el mismo, de forma que, colocándola con antelación al corte de las placas sirve, además, de apuntalamiento.

Cuando el forjado está formado por placas Farlap (Figura 11) se distinguen tres casos, según el ancho de hueco a realizar:

– Hueco de ancho menor que 28 cm. Se sitúa éste de forma que coincida con una de las suelas de la placa Farlap, de modo que, si se trata en cada placa de un único hueco, no es necesario la colocación de estructura auxiliar. En alguno de los tipos de placas podían abrirse en la misma hasta dos huecos.

– Hueco que "invade" algún nervio. Es necesario un cálculo de los esfuerzos que resiste la sección "restante" de placa asegurándose que estos sean mayores que los de cálculo. Dependiendo del tipo de placa, no siempre es posible o da lugar a limitaciones en cuanto a distancia del hueco al apoyo de la placa.

– Hueco que corta varios nervios o afecta a varias placas.

  De forma análoga al de las placas alveolares, es necesario la colocación de un bastidor metálico en forma de "hache" que permita el apoyo de la/s placa/s cortada/s.

  Esta estructura está formada también por HEBs soldadas. Se calcula para el peso propio del forjado y la sobrecarga de uso (1 KN/m^2). Se sitúa, en general, embebida en el canto del forjado. Sin embargo, en el caso de no existir instalaciones, las HEB longitudinales se sitúan, por mayor facilidad de ejecución, sobre el propio forjado.

7. CORRECCIONES DURANTE LA EJECUCIÓN

Como en cualquier tarea, resulta inevitable la presencia de deficiencias e imprecisiones. El Sistema de Calidad de Terminal Barajas UTE [8], en general, y el procedimiento de trabajo de la OTCO, en particular, tenía como objetivo la detección de los mismos y llevar a cabo la oportuna corrección. Recogeremos, a continuación, algunos de los casos que consideramos pueden resultar más interesantes.

7.1. Bajadas de resistencia del hormigón

Este es un hecho que, con relativa frecuencia, se presenta durante la ejecución de múltiples obras; en general, no reviste excesiva gravedad pero siempre resulta indeseable.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Realizaciones

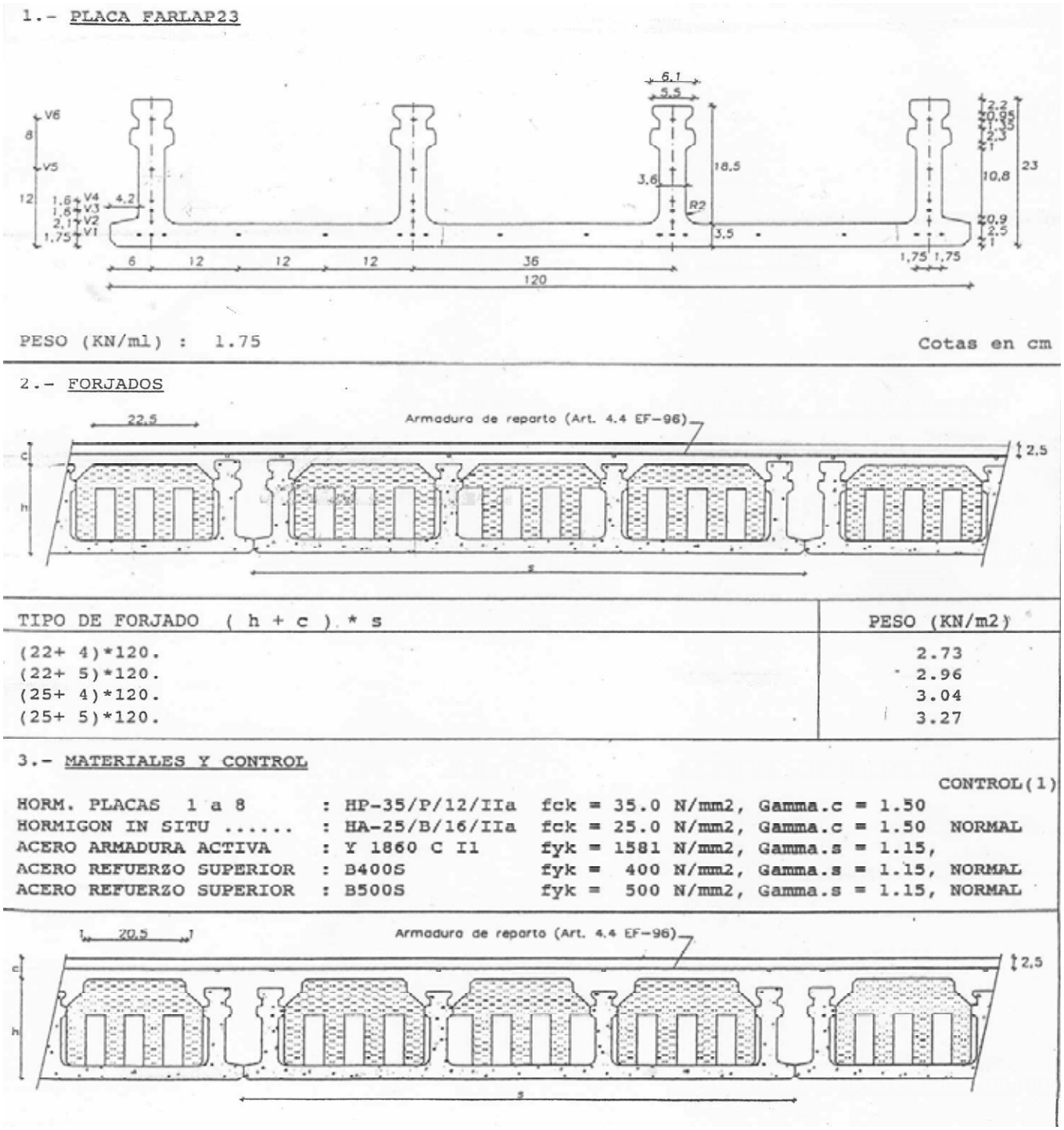


Figura 11. Placa aligerada.

En la obra del NET, el número de casos detectados resultó por debajo del promedio habitual registrado en el sector debido, fundamentalmente, a los controles establecidos, tanto por los equipos de AENA como por los constructores agrupados en la UTE. El rigor aplicado ha permitido separar los casos de baja resistencia estimada reales de aquellos otros que, aunque en pequeño número, se debían a deficiencias en el proceso: bien por retirada de probetas en plazos de tiempo superiores a los establecidos, tratamiento inadecuado (apilado ocasional), etc. Debe tenerse en cuenta que el elevado número de probetas a manipular, impide alcanzar la total eficacia en el proceso, pese a lo numerosos y exigentes que resulten los controles adoptados.

En el tratamiento de las bajadas de resistencia del hormigón se han seguido las prescripciones de la EHE, así:

– Se aceptan aquellos lotes en los que la resistencia estimada, pese a resultar inferior a la de proyecto, es igual o superior al 90 % de ésta.

– Se procede al análisis numérico de aquellos casos en que, para el elemento en cuestión, la resistencia estimada resultó inferior al 90 % de la característica.

El procedimiento seguido, en este segundo caso, ha consistido en la realización por la Oficina Técnica de la UTE de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

cálculos precisos para comprobar el coeficiente de seguridad que resulta, considerando la resistencia estimada del hormigón. Se admiten aquellos casos en los que dicho coeficiente es igual o superior al fijado en el proyecto y excepcionalmente, aquellos otros, en los que la merma de dicho coeficiente resulta despreciable, inferior a un 5 %, como máximo.

El informe elaborado por la Oficina Técnica se somete al chequeo del EGCO que, si lo estima correcto, lo eleva a la Dirección de la Obra para que proceda a su aprobación definitiva. Naturalmente, si los resultados del análisis fueran inferiores a los requeridos, se procedería automáticamente a la demolición de los elementos incluidos en el lote y en casos particulares, al refuerzo de los mismos.

La toma de decisiones se ha facilitado permitiendo, al mismo tiempo, garantizar la mayor fiabilidad de las mismas, debido a que, como consecuencia de las disposiciones adoptadas al inicio de la obra, ha sido posible contar con toda la información necesaria. Así:

– Se ha registrado la trazabilidad de la totalidad del hormigón puesto en obra, lo que permite conocer el destino del hormigón de cada amasada.

– Además de las probetas preceptivas para ensayar a 28 días, se han elaborado otras para romper a 3 y 7 días, más las de reserva, por si fueran necesarios ensayos de confirmación posteriores; todo ello ha permitido establecer las curvas de endurecimiento de los hormigones puestos en obra.

– Se dispusieron termopares en determinados elementos de hormigón, midiendo simultáneamente las temperaturas ambientes, lo que permitió establecer la correlación entre las curvas de endurecimiento del hormigón y la temperatura ambiente.

Disponer de esta información proporciona el máximo conocimiento del estado de los diversos elementos estructurales, en cada caso. Como ejemplo, en un lote compuesto por 10 pilares cuya confección ha exigido el empleo de 10 amasadas, se han ensayado probetas correspondientes a 4 de ellas, obteniendo buenas resistencias en 3 y una deficiente, lo que obligaría a rechazar el lote completo.

Mediante la extracción de dos testigos por pilar, de aquellos constituidos por amasadas de las que no se han ensayado probetas, se reúne la información completa y dado que todos los testigos proporcionan resistencias por encima de la característica, se decide desechar un único pilar, el afectado por la única amasada deficiente, en lugar del lote completo. Con objeto de garantizar la fiabilidad de los testigos, la extracción de éstos se efectuó a 1,5 m por encima del nivel de arranque y a aproximadamente 1,00 m por debajo de la testa.

Naturalmente, se han considerado otros aspectos no menos importantes, como la compacidad o la calidad de acabados. No se permite la presencia de coqueras, nidos, ni la de excesivo número de burbujas, ya que todo ello redunda en la consiguiente pérdida de cualidades tan importantes como el adecuado aspecto estético o la durabilidad.

Además de este sistema, por otra parte habitual, de tratar las bajadas de resistencia a compresión del hormigón puesto en obra, se estableció inicialmente, otro que permitiera reducir los problemas a medio plazo durante el proceso constructivo.

El ritmo de la obra obligaba a comenzar con la ejecución de los forjados antes de transcurridos los 28 días tras el hormigonado de los pilares, y de los pilares del tramo superior antes de los 28 días tras el hormigonado de las vigas del nivel inmediatamente inferior. Este proceso podía traer como consecuencia que, si se producía alguna bajada de resistencia que dejara al elemento estructural correspondiente con un coeficiente de seguridad inadmisible, hubiera que reforzar o demoler. Lo primero, debido a las características estéticas singulares del edificio, en numerosas ocasiones sería una mala solución. Lo segundo supondría un serio inconveniente no sólo económico sino, sobre todo, en el plazo de la obra. Para intentar evitar esta circunstancia, y durante una fase de la misma, se estableció un sistema según el cual se controlaban las resistencias a 1, 3, 7 y 14 días. Se fijaban unos valores mínimos por extrapolación de dichos resultados y si las resistencias a 28 días, así obtenidas, resultaban menores al 80% de la característica en pilares y al 75% en vigas, se procedía automáticamente a la demolición. Este sistema llevó a la demolición de 11 tramos de pilares (lo que representa aproximadamente el 0,2% de los existentes), pero evitó circunstancias aún más desfavorables para el avance de la obra o para la calidad de la misma, objetivo perseguido por todos los agentes que intervenían en ella.

7.2. Postesado de vigas

La asistencia que la Oficina Técnica ha prestado a obra, como consecuencia de defectos en la ejecución de postesados de vigas, se ha limitado, afortunadamente, a problemas tradicionales de la especialidad y que se han producido en número muy limitado: rotura de cordones o cuñas, tapones en vaina, etcétera.

Se ha aplicado un tratamiento tradicional a los casos de rotura de cordones y cuñas; generalmente, dicho tratamiento ha consistido en: destesado, sustitución de elementos dañados y afectados, e inicio de las tareas de tesado hasta su conclusión.

Pese al elevado número de vigas tesadas, únicamente se ha registrado un tapón en una de las dos vainas dispuestas en dicha viga. En este caso, el procedimiento prescrito, aunque tradicional, ha sido concienzudo, respetando las siguiendo fases:

- Localización de la ubicación y longitud del tapón en función de los alargamientos medidos en ambos extremos.

- Apeo y marcado de las secciones de corte de modo que se garantice la retirada completa del tramo de vaina taponado.

- Corte, con cortadora de hilo de diamante por las marcas establecidas y retirada del tramo de viga cortado.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 12.Precorte con disco de vigas.

- Precorte perimetral mediante disco, de 2 cm de profundidad, situado aproximadamente a 20 cm de las secciones de corte para coincidir con las marcas de los encofrados; además se realizan, al menos tres precortes horizontales sin dañar las armaduras longitudinales (Figura 12).

  Esta operación pretende facilitar la retirada del hormigón, liberando 20 cm de longitud en todas las barras longitudinales, sin producir microfisuración en éste (Figura 13).

- Limpieza de las esperas puestas al descubierto y de la superficie cortada, a fin de eliminar restos de hormigón en las primeras así como polvo y elementos sueltos en ésta y en las superficies de corte.

- Restitución de las armaduras, empalmando las principales, mediante manguitos, a las esperas previstas.

- Conexión de vainas y encintado cuidadoso de las uniones (Figura 14).

- Colocación de encofrados, aplicación de resina epoxi a los paramentos de corte, vertido del hormigón, vibrado y curado.

- Enfilado de armaduras activas, tesado e inyectado de vainas.

Para garantizar al máximo la correcta realización de las tareas descritas, se dispusieron, además de la vigilancia normalmente establecida, *tres hitos de control*:

– Corte, descubrimiento de armaduras y limpieza.

– Restitución de las armaduras, colocación de vainas y su encintado.

– Desencofrado.

Figura 13. Corte transversal de viga.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 14. Montaje de vainas y armadura pasiva.

En cada uno de estos hitos, además de la inspección visual, se ordenaron registros fotográficos. Estas inspecciones se llevaron a cabo por personal especializado adscrito al Departamento de Calidad y Medio Ambiente.

RECONOCIMIENTO

Una obra siempre es el fruto del trabajo conjunto de muchas personas, tanto en la fase de proyecto como de construcción. En los diversos artículos que forman de esta publicación aparecen reflejados tanto la Propiedad y Dirección de Obra por parte de AENA, como los equipos de arquitectura de los estudios de Antonio Lamela y Richard Rogers, y de ingeniería de proyectistas de estructuras y supervisores de las mismas, así como las empresas constructoras. A todos ellos hemos de reconocer y agradecer el gran trabajo efectuado.

En este artículo, por los aspectos desarrollados, quisiéramos realizar un reconocimiento especial a aquellos técnicos que, en diversas etapas de la obra, y junto a los autores de este escrito, han formado parte del Departamento de Estructuras de la Oficina Técnica del Constructor en Obra por parte de Terminal Barajas UTE (desarrollando el Proyecto de Construcción, la Ingeniería de Detalle de Construcción y el seguimiento de la obra): Antonio Escarda, Manuel Gil, Joaquín Bueno, Felipe Fernández, Jesús Labarra, Juan Muñoz Caleffa, Fernando Pinedo, Rafael Pérez, Juan Carlos Sánchez-Castro, Javier Martínez, Javier García y Enrique González.

REFERENCIAS

[1] Gómez Hermoso, J.: "Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Proyecto y construcción". V Congreso de Ingeniería del Transporte, Santander, 2002.

[2] Gómez Hermoso, J.: "Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Descripción del proyecto. Cimentación". II Congreso de Puentes y Estructuras de edificación, ACHE, Madrid, 2002.

[3] Gómez Hermoso, J.: "Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Estructura de hormigón". II Congreso de Puentes y Estructuras de edificación, ACHE, Madrid, 2002.

[4] Gómez Hermoso, J.: "Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal. Estructura metálica". II Congreso de Puentes y Estructuras de edificación, ACHE, Madrid, 2002.

[5] Gómez Hermoso, J.: "Nuevo Edificio Terminal. Una puerta para Europa". Cauce 2000, nº 113, noviembre-diciembre 2002.

[6] Gómez Hermoso, J.: "Aeropuerto de Madrid-Barajas. Nuevo Edificio Terminal". XI Jornadas Técnicas "Tecnología de la Edificación", Universidad de Cantabria, 2003.

[7] Lamela, Carlos; Moya, Paz: "Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[8] Hontoria Asenjo, Alberto: "Sistema de Calidad y su aplicación en la ejecución de la estructura del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[9] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: "Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[10] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: "Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[11] Peña Pascual, José Manuel: "Tesado multipunto de la fachada del Edificio Terminal". Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Edificio Satélite de la nueva Área Terminal

Satellite Building at the new Terminal Area

José Pedro Fernel Fernández
Ingeniero Aeronáutico
Dirección Técnica
Dragados, S.A.

RESUMEN

Este artículo describe diversos aspectos y características del Edificio Satélite, integrado en la Nueva Área Terminal del aeropuerto de Madrid-Barajas. A 2 kms de distancia del Edificio Terminal, situado entre las pistas, el Edificio Satélite está destinado a albergar los vuelos internacionales. Este edificio consta de dos volúmenes y seis niveles en cada uno de ellos. El primero es el Dique de embarque y desembarque de pasajeros, por dos niveles distintos, con 927 m de longitud y 26 puertas de acceso, 16 de ellas dobles para atender a dos aviones simultáneamente. El segundo volumen estará destinado al control de pasajeros y la zona comercial. La unión con el Edificio Terminal se realiza mediante el Túnel de Servicios Aeroportuarios.

Palabras clave: Aeropuertto, Barajas, Satélite, estructura, fachada, vidrio, junta, cubierta, hormigón, pilar, protección, bambú.

SUMARY

This paper describes several aspects and characteristics of the Satellite building, integrated in the New Terminal Area of Madrid-Barajas airport. The Satellite Building is placed between the runways, two kilometres distant from the Terminal Building and is assigned to the operation of international flights.

This building is composed of two volumes and six levels (floors) in each of the bulks/volumes. The first one is the boarding dock for passengers, at two different levels, 927 m. long and 26 access doors, 16 of which are doubled in order to could operate two planes simultaneously. The second bulk is for passengers control and commercial area. The Satellite Building is connected with the Terminal Building through the Airport Services Tunnel.

Key words: *Airport, Barajas, Satellite, structure, front wall, glass, joint, roof, concrete, pillar, protection, bamboo.*

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Plan Aeropuerto de Madrid – Barajas, destinado a potenciar la capital como principal puerta de conexión de los vuelos entre Hispanoamérica y Europa, se amplía dicho Aeropuerto basándose en un tráfico previsto de más de 70 millones de pasajeros [1].

Dentro del conjunto total, el edificio Satélite se destina, preferentemente, a absorber operaciones internacionales, situándose en él los controles de pasajeros, tanto en salidas como llegadas, mediante la instalación de 58 puestos de registro.

El Edificio Satélite cuenta con un dique de 927 x 39 m para embarque y desembarque de pasajeros y una zona central de 135 x 57 m para el proceso aeroportuario y áreas comerciales. La orientación, longitudinal, Norte-Sur, se encuentra entre dos pistas paralelas y el acceso se produce mediante el Túnel de Servicios Aeroportuarios, que conecta los dos edificios

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Nueva Terminal y Satélite, con dos calzadas para vehículos y un tren automático de pasajeros (APM) que utiliza menos de 4 minutos en cada trayecto [1] [2] [3].

La superficie construida es de 287.384 m^2, destinándose 13.245 m^2 a áreas comerciales. La construcción de este edificio Satélite fue realizada por una UTE formada por Dragados y OHL.

2. CIMENTACIÓN Y ESTRUCTURA

De acuerdo con el Informe Geotécnico existente, en la zona Sur se ha realizado una cimentación directa, mientras que en el dique Norte fue necesario efectuar una profunda, mediante pilotes. En donde existen hasta dos sótanos se han construido muros perimetrales de hormigón armado, ejecutándose pantallas de hormigón cuando hay un tercer sótano.

Las pilas, situadas en una malla de 9 x 18 m, son circulares de hormigón armado, excepto las del eje central que son rectangulares, simples o dobles, y recogen los pilares centrales de la estructura metálica de la cubierta (Figura 1).

Las vigas son de hormigón pretensado, de 18 m de luz, con secciones de 180 x 80 cm para los niveles sobre rasante y 180 x90 cm para cotas bajo ésta. Las juntas de dilatación, situadas cada 72 m, se realizan en las vigas mediante aparatos metálicos.

El forjado está constituido por placas alveolares de 20 cm de canto y 10 cm de capa de compresión, con la particularidad de que en su diseño se han previsto unos nervios macizos centrales para aojamiento de los elementos de fijación.

En [4] se describen con detalle diversos aspectos de la estructura de hormigón del edificio y sus diferentes elementos.

La estructura de fachada, de acero inoxidable, tiene forma de husillo con montantes horizontales, disponiéndose entre cada dos de estos elementos, vigas metálicas para soportar los paños de cristal que constituyen el muro cortina de la fachada [5].

La carpintería de aluminio utilizada está formada por perfiles extrusionados, aleación 6063 T5, con un espesor mínimo de 3,00 mm, cuando está sometido a impacto, y de 1,6 mm, si está protegido. El acabado se realiza en anonizado natural mate, de 20 mm de espesor, para los elementos vistos.

El muro entero está acristalado, con molduras de 3,00 m horizontalmente y 2,435 m verticalmente, para la franja interior, 2,290 m, para tramos intermedias, adaptándose todas las piezas superiores a la curvatura definida por el falso techo (Figura 2).

La separación entre vidrios la forma un perfil de aluminio, en cuyo interior se introduce un producto desecante, garantizando la estanqueidad de un doble sellado perimetral, constituido el primero por butilo, sobre marco separador, antes del montaje del vidrio y el segundo con silicona bicomponente de 8 x 12 mm (ELASTOSIL IG 25)

El sellado del doble acristalamiento se ha realizado a 17 mm del borde inferior de la placa de vidrio, para que quede oculto después de su colocación.

Para los encuentros con las prepasarelas, los perfiles periféricos de acero se han forrado con chapas de aluminio, anoni-

Figura 1. Aspecto de ejecución de la estructura.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 2. Fachada acristalada con perfil de aluminio.

zado en su color, de 2 mm de espesor, separadas convenientemente mediante cinta de poliuretano autoadhesiva, a dos caras, para evitar pares galvánicos.

3. CUBIERTA SINGULAR

La cubierta del nuevo edificio Satélite del aeropuerto de Barajas está formada por un módulo con doble curvatura, simétrico a ambos lados de su eje longitudinal, que se repite a lo largo de todo el edificio, con unas dimensiones de 9 x 36 m y constituido por una estructura metálica, una cobertura exterior de aluminio (Figura 3) y otra, inferior, del mismo material perforado [2] [5]. Entre ambas chapas se alojan los aislamientos acústico y térmico. En el interior se coloca un falso techo de bambú, que se comentará mas adelante.

El soporte de estos elementos es una línea de pilares centrales divididos en cuatro brazos. A pesar de tener una separación de 18 m, dan apoyo a las vigas principales, cada 9 m, coincidiendo así con el módulo. Los bordes de la cubierta se sustentan sobre unos pilares extremos en "Y" que arrancan sobre unas bases de hormigón visto de concepción arquitectónica.

La cubierta forma un "sandwich" compuesto de varias capas:

La primera es una chapa nervada, perforada de aluminio, que se sube con grúa y se atornilla a las correas. Sobre esta lámina se disponen perfiles metálicos, en forma de W, modulados siguiendo las mismas directrices que las correas, siendo necesario colocar un elemento de refuerzo con la misma forma de la chapa base grecada, aumentando la resistencia de fijación, entre la chapa y el perfil W (Figura 4).

Figura 3. Cubierta exterior de aluminio.

Figura 4. Aspecto del montaje de la cubierta.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Después se sitúa una capa de aislamiento acústico, de lingotes de fibra de unos 35 mm de espesor, que se dispone adaptándose a las grecas de la chapa inferior. Sobre ella se coloca otra, de fibra de panel, de 1.000 x 1.250 mm. Entre ambos aislamientos de la cubierta se encuentra una barrera de vapor autoadhesiva.

A continuación se colocan unos perfiles de aluminio extruido, en forma de T invertida, de 190 mm de alto, atornillados a los perfiles W y dispuestos cada 40 cm. Estos elementos aportan el espesor necesario para el aislamiento y cuentan con un borde superior redondeado, para formar la junta mecánicamente con el lateral de la lámina superior.

Seguidamente se encuentra una lámina de aislamiento acústico, intermedio, que consiste en un tablero aglomerado de fibras de 16 milímetros de espesor y reducción acústica total = 48 dB A.

Entre los perfiles metálicos se coloca una lámina de aislamiento térmico de lana de roca semi-rígida de 190 mm.

La última capa que cierra el sandwich es una chapa nervada de aluminio, de unos 90 mm de espesor, que va enganchada en los clips de sujeción (”T” invertida).

5. PROCESO DE MONTAJE

Las láminas de aluminio superior e inferior tienen que ser precurvadas, con doble curvatura, en fábrica antes de su montaje (Figuras 5, 6 y 7).

Figura 5. Láminas precurvadas de aluminio.

Todos los elementos se suben con una grúa a la zona de acopio, que suele ser una plataforma situada sobre el propio lucernario. La chapa la colocan tres montadores, uno a cada lado y otro en el centro para poder atornillarla a las correas.

Esta operación se realiza por unas escaleras, colocadas en la base del canalón. Una vez instalada, se puede transitar sobre ella para la ejecución de las capas posteriores. La placa, que cierra el sándwich, va enganchada en los clips de sujeción

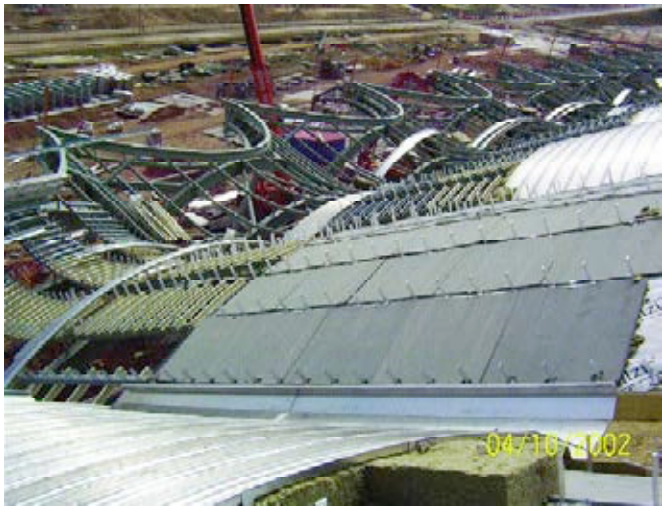


Figura 6. Ejecución de la impermeabilización y aislamiento.

(”T” invertida) para poder pasar el robot y cerrar cada una de las bandejas con los clips, pudiendo circular sobre ellas. De este modo se puede poner la siguiente bandeja y cerrar, con el mismo proceso sucesivamente, evitando riesgos de caída.

Figura 7. Vista de taller para conformado de chapas de aluminio.

5. FALSO TECHO DE BAMBÚ

El interior de la cubierta del edificio Satélite está diseñado con un falso techo de bambú, material muy flexible y que le da al conjunto un aspecto muy cálido [2]. Las lamas se han dispuesto separadas, una cierta distancia, proporcionando unas interesantes transparencias que le dan una apariencia muy ligera, facilitando de ese modo su mantenimiento. Los elementos de climatización se han diseñado para su instalación por el suelo.

El proceso de montaje de lamas de bambú, que inicialmente estaba previsto realizar sobre el bastidor ya montado en la cubierta, se ha optimizado con el fin de minimizar los riesgos para el personal, mejorar las condiciones de trabajo y reducir el tiempo y coste en la ejecución de esta actividad. Para ello se ha realizado un premontaje de módulos, sobre la losa de forjado, dividiendo la cubierta en 124 tramos de idéntica geo-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

metría y estos, a su vez, en 20 módulos independientes, 10 a cada lado del eje, que se construyeron, en su totalidad, en el suelo elevándose a continuación, y fijándose a la estructura de cubierta. Cada uno de ellos, formado por 2 arcos principales, perpendiculares a las vigas del edificio, unidos mediante 20 correas.

Figura 8. Vista interior del falso techo de bambú.

Los arcos principales son generados a partir de tubo de Ø 60 mm y 3 mm de espesor, que se curva para conseguir la forma de bóveda de medio punto proyectada. Los secundarios o correas se obtienen a partir de tubo de Ø 32 mm y 2 mm de espesor, curvados para seguir la línea que forman las vigas de la estructura principal del edificio. Los tubos de correas y arcos son de acero galvanizado, garantizando una resistencia a la corrosión superior a 25 años.

Figura 9. Detalle de lucernario.

Las lamas de madera se suministran, ya cortadas, en longitudes de 2.00 m y 100 mm de ancho excepto las correspondientes a los extremos, que se hacen a medida en un taller auxiliar de carpintería, en la obra, para permitir el correcto ajuste de las mismas a los extremos de la viga.

Todos los elementos de bambú fueron tratados, dependiendo de su ubicación. Los interiores cumplen la normativa de

Figura 10.Vista general interior del falso techo.

protección contra incendios y están protegidos contra insectos y hongos. Los exteriores no necesitan cumplir la CPI 96, pero tienen que ser resistentes a la intemperie por lo que se les aplica un barniz. También se dispone sobre ellos una malla de nylon resistente a la intemperie, que se sujeta sobre la propia estructura portante del bambú (Figuras 8, 9 y 10).

El montaje de un módulo se compone de 3 operaciones elementales:

- Subestructura metálica.
- Láminas de madera
- Elevación y fijación en la cubierta principal.

El montaje de la subestructura metálica de cada módulo se realiza mediante unos útiles que posicionan y fijan los arcos y correas en el espacio para permitir su unión mediante soldadura por electrodo.

Seguidamente los puntos soldados se galvanizan, mediante spray, para mantener la protección de los tubos deteriorada en la operación.

Después se extrae la subestructura mediante un elemento manipulador.

Cuando está fuera del útil de montaje, se procede con las láminas de madera partiendo del centro del módulo hacia las correas exteriores, mediante piezas de 2 m de longitud por 100 mm de anchura.

Las maderas extremas, cortadas en obra, no se montan en esta fase, sino en la posterior al izado, una vez que los tramos están soldados en su ubicación definitiva.

La última operación a realizar consiste en la elevación de los módulos a la cubierta principal, para fijarlos definitivamente mediante unas orejetas soldadas a las alas de las vigas principales de la estructura. Esta unión se realiza con tornillos, de forma que se puedan desmontar y bajar al suelo si es necesario.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Las piezas son izadas, a su posición, mediante unas plataformas diseñadas en taller que incluyen un contrapeso móvil para que el izado se realice de forma estable y unos juegos de eslingas especiales que las elevan a su posición definitiva (Figura 11).

Figura 11.Elevación de módulos del falso techo.

6. INSTALACIONES

Para climatización y ventilación, se ha diseñado un sistema, para las zonas de salidas, mediante difusión por desplazamiento. El resto de las áreas de pasajeros se tratarán mediante difusión por mezcla.

Para las áreas VIPS y restaurantes, se utilizarán sistemas todo aire. También se han previsto sistemas de ventilación y extracción de humos para las zonas de SATE, APM, almacenes y viales.

La producción de agua enfriada y sobrecalentada, se realiza en una central de cogeneración, para servicio de la NAT, siendo la demanda frigorífica de 12.000 KW y de 12.300 KW la calorífica.

Para el suministro de energía eléctrica, se han instalado ocho centros de transformación, dotado cada uno con tres transformadores de 2.500 KVA, alimentados por tres dobles anillos de media tensión en configuración abierta, con dos subestaciones como suministradoras de potencia.

El alumbrado se ha dispuesto con variadas soluciones, destacando, por su originalidad, el de las zonas públicas de una altura, para las que se han diseñado luminarias con fluorescentes circulares de gran significado arquitectónico y la iluminación de los diques resuelto mediante una proyección indirecta, con reflexión, sobre espejos multifacetados.

Para el movimiento de pasajeros, se han instalado 44 ascensores, 20 de ellos panorámicos, 26 escaleras mecánicas y 1.500 m de pasillos rodantes, todo ello regulado por sistemas de control y seguimiento específicos.

7. REVESTIMIENTO Y ACABADOS

La imagen característica del edificio la constituye la cubierta de chapa de aluminio en ala de gaviota, en la que existen unas lucernarias de grandes dimensiones que permiten la iluminación natural del interior.

En la parte interna el usuario percibe un cálido ambiente, debido al falso techo de láminas de bambú, que cuenta con una geometría “paralela” a la de la cubierta general.

La zona de Servicios, situada en su mayor parte bajo rasante, dispone de grandes espacios contenedores cuyos cierres perimetrales son los muros estructurales de hormigón visto.

La zona pública, con su muro cortina de vidrio que forma su cerramiento perimetral, permite una visual directa entre el interior y exterior del edificio. En estas áreas se ha colocado un pavimento de piedra caliza con rodapiés de acero inoxidable o piedra.

En los puentes metálicos de conexión, la pavimentación es a base de vidrio, para dejar pasar la luz entre las distintas plantas.

El acceso a los aviones se efectúa mediante prepasarelas y rampas, con cerramiento acristalado con vidrio de control solar para facilitar la visión durante el trayecto.

Para las protecciones solares, se han dispuesto difusores textiles, en lucernarias y cortinas, constituidas por paneles de perfil de aluminio suspendidas de la cubierta a todo lo largo de la fachada.

El resto de divisiones y barandillas son pantallas de vidrio de 3,00 m de altura en zonas públicas y mamparas en áreas de oficina y divisiones interiores.

REFERENCIAS

[1] Hesse Martín, José Manuel: “Planteamiento aeroportuario de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Lamela, Carlos; Moya, Paz: “Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Fernel Fernández, José Pedro: “Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] Corres Peiretti, Hugo; Romo Martín, José; Pérez Caldentey, Alejandro; Romero Rey, Eduardo: “Concepción estructural, proyecto de construcción y asistencia técnica de las obras de hormigón estructural de los distintos edificios e infraestructuras de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[5] González Barcina, José M.; Bernal Sahún, Pablo: “Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Estructuras metálicas de cubierta y de muros cortina del Edificio Satélite

Roof and façade steel structures of the Satellite Building

José Manuel González Barcina
ICCP Aleph Consultores, S.L.

Pablo Bernal Sahún
ICCP Aleph Consultores, S.L.

RESUMEN

El Edificio Satélite se inserta junto con el Edificio Terminal en la ampliación del aeropuerto de Madrid Barajas. Ambos edificios tienen estructuras similares de cubierta y fachadas, centrándose este artículo en los aspectos específicos del Edificio Satélite.

La cubierta del Edificio Satélite se ha resuelto con un entramado de vigas curvas de acero y pilares inclinados que soportan las cargas de pretensado necesarias para estabilizar la estructura de las fachadas, que a su vez sirven de arriostramiento al conjunto.

El tesado de las fachadas se realiza de forma indirecta, deformando la estructura de cubierta con carácter previo al montaje de las celosías de fachada. Este proceso ha supuesto una operación delicada que ha exigido un diseño previo específico y una ejecución y control muy cuidados.

Palabras clave: Aeropuerto, Barajas, estructura metálica, cubierta, fachada, acero inoxidable, tesado multipunto.

ABSTRACT

The Satellite Building is inserted with the Terminal Building, in the new Madrid Barajas airport terminal area. Both buildings have similar roof and façades structures, being centered this article, in the specific aspects of the Satellite Building.

The roof of the Satellite Building has been solved with a framework of curved steel beams and sloped pillars that support the loads of the necessary prestressing of the façades, that as well serve as bracing the set.

The prestressing of the façades is made of indirect form, deforming the cover structure previously to the assembly of the façade lattice windows. This process has supposed a delicate operation that it has demanded a specific previous design, a detailed execution and strong control during the works.

Key words: *Airport, Barajas, steel structures, façade, stainless steel, multipoint prestressing.*

1. INTRODUCCIÓN

Aleph consultores ha proyectado la estructura metálica de cubierta y fachadas del Edifico Satélite de la Nueva Área Terminal de Madrid Barajas. El trabajo realizado ha incluido el diseño del proceso de tesado de las fachadas, además del control del proceso constructivo y la asistencia técnica durante la ejecución, con personal a pie de obra a tiempo completo. Estas estructuras son similares a las homólogas del Edificio Terminal de la Nueva Área Terminal de Madrid Barajas [1] [2]. El objetivo de este artículo es resumir las particularidades del proyecto y la construcción de las estructuras metálicas de cubierta y fachadas del Edificio Satélite y en particular el proceso de tesado de sus muros cortina.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

El Edificio Satélite, con una superficie total construida aproximada de 287.000 m^2, está formado por un cuerpo principal de 927x39 m orientado de Norte a Sur, destinado al embarque y desembarque de pasajeros y un anexo central de 135x57 m destinado al proceso aeroportuario y a zonas comerciales. El acceso al edificio, debido a su situación entre dos pistas paralelas de aterrizaje y despegue, se realiza a través de un túnel de servicios aeroportuarios que comunica con el Edificio Terminal [3] [4].

2. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

La cubierta del Edificio Satélite se ha resuelto con una estructura metálica formada por un entramado de vigas curvas con sección doble T y arriostramientos tubulares (Figura 1). Los perfiles principales, separados 9 m entre sí, tienen la forma característica de ala de gaviota que confiere a este edificio gran parte de su personalidad. Estos elementos se orientan en dirección Este Oeste y tienen una longitud total en planta de 72 m divididos en tres vanos de 24, 18 y 24 m con vuelos extremos de 3 m. Ortogonalmente a los perfiles principales se disponen las vigas secundarias, separadas entre 3 y 3.85 m, con una luz de 9 m y forma de arco circular de unos 6.5 m de radio. Triangulando las dos familias de perfiles principales y secundarios se disponen los arriostramientos tubulares, encargados de mantener la estructura indeformable en su plano. Las correas que sustentan la formación de cubierta se disponen con una separación de aproximadamente 1 m, paralelas a las vigas principales y apoyadas sobre las secundarias.

El apoyo de la estructura de cubierta se realiza mediante pilares metálicos inclinados en dirección Este Oeste. Cada pilar sirve de apoyo a dos vigas principales consecutivas de forma que la separación entre pilares se eleva a 18 m (Figura 2). En los apoyos centrales de las vigas principales, los pilares toman forma de V mientras que en los apoyos extremos los pilares toman forma de Y.

Los muros cortina completan el cerramiento del edificio junto con la cubierta. En las fachadas Este y Oeste del cuerpo principal del edificio se sitúa el muro cortina tipo A-1 mientras que en el anexo se sitúa el tipo A-5. En las fachadas Norte y Sur del cuerpo principal se sitúa el muro cortina tipo A-3 mientras que en el anexo se pueden encontrar los muros cortina tipo A-4, A-4a y B-2 (Figura 3).

Todos los muros cortina del edificio están formados por correas horizontales de acero al carbono con luces entre 9 y 15.6 m, colgadas de la cubierta mediante tirantes de acero inoxidable situados cada 3.0 m coincidiendo con la modulación de los vidrios. Las cargas horizontales de viento se transmiten a las estructuras de cubierta y forjados mediante pilares de acero al carbono en los muros cortina tipo A-3, A-4 y B-2 mientras que en los muros tipo A-1 y A-5 la transmisión se realiza mediante seudo-celosías pretensadas de acero inoxidable.

Los muros cortina tipo A-3 cubren una superficie aproximada de 1.180 m^2 acristalados alcanzando una altura máxima de 17.3 m. La altura del muro cortina queda dividida por 7 corre-

Figura 1. Estructura metálica de cubierta en construcción.

Figura 2. Vista interior del edificio con la cubierta terminada.

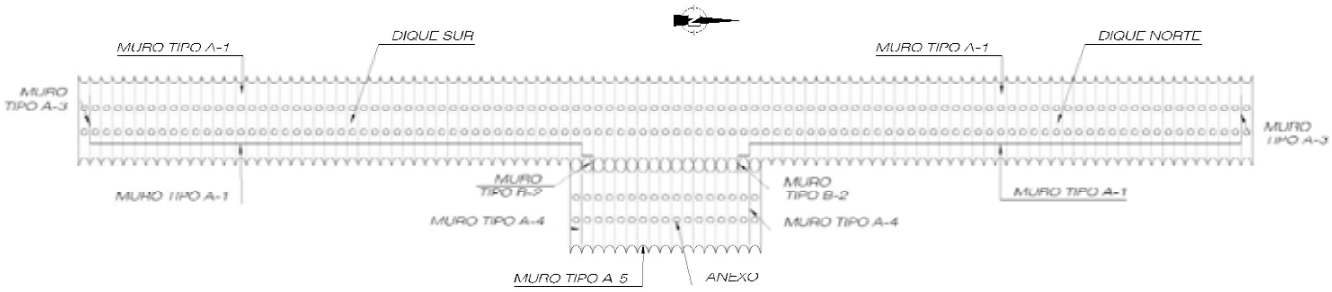


Figura 3. Croquis de planta del edificio con muros cortina.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

as horizontales de acero al carbono de 38.4 m de longitud máxima, situadas las 5 primeras a la misma cota que las del muro cortina tipo A-1 con el que hace esquina (Figura 4). Las correas tienen una sección transversal tipo cajón con un canto vertical constante de 110 mm y horizontal variable entre 150 y 350 mm. El vidrio, cuyo eje está situado a 175 mm del eje de los tirantes de suspensión y a 100 mm de la cara exterior de la correa, se apoya en está a través de una serie de pletinas de acero soldadas directamente a la correa y de un perfil de aluminio interpuesto. La excentricidad de la carga vertical del vidrio frente a los tirantes de suspensión, se transmite a los pilares mediante torsión en la correa. El apoyo de las correas en los pilares intermedios, se realiza mediante bulones verticales de longitud suficiente para permitir el libre movimiento vertical de la correa. Los pilares intermedios están formados por dos tubos Ø 323.9x20 separados 1.2 m y empresillados con tubos Ø 273x20 cada 4.58 m. La altura variable de la cubierta da lugar pilares de 17.1 m y de 13.5 m de altura.

Figura 4. Muro cortina tipo A-3, vista interior.

El planteamiento del muro cortina tipo A-4, que cubre una superficie acristalada de unos 1.530 m^2 de las fachadas Norte y Sur del anexo, es muy similar al anterior con la particularidad de encontrarse interrumpido por un forjado intermedio como le ocurre al muro tipo A-5, con el que hace esquina (Figura 5).

Figura 5. Muro cortina tipo A-4, vista exterior.

El muro cortina B-2 cubre las fachadas Norte y Sur del espacio existente entre el cuerpo principal del edificio y el anexo con una altura máxima de 23.0 m. La altura del cerramiento queda dividida por 10 correas de 15.6 m de longitud, suspendidas de la cubierta mediante tirantes Ø 24 de acero inoxidable 1.4401 C700 situados cada 3 m. Las cargas horizontales de viento se transmiten a cubierta y forjados mediante pilares fabricados en acero al carbono, que forman directamente esquina con otros muros cortina o cerramientos del edificio, de forma que las correas trabajan para las cargas horizontales, de forma isostática con una luz de 15.6 m (Figura 6). El muro cortina tipo B-2 es atravesado por una junta de dilatación de la estructura de cubierta, dispuesta entre el cuerpo principal del edificio y el anexo, de forma que se ha dotado a las correas de un empotramiento deslizante en su punto medio. Este empotramiento se ha logrado mediante dos bulones Ø 120 mm de acero inoxidable 1.4057 QT900, alojados en cuatro cartelas taladradas, dos a cada lado de la junta.

Figura 6. Muro cortina tipo B-2, vista exterior previa a la colocación del vidrio.

El muro cortina tipo A-1 es el más extenso y el más característico del edificio, cubriendo una superficie aproximada de 23.250 m^2, acristalados con una altura media aproximada de 13.5 m. Este muro cortina queda dividido en paños de 9 m coincidiendo con la modulación general del edificio. En cada paño la estructura está formada por 5 correas horizontales de acero al carbono suspendidas de 2 pares de tirantes de acero

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

inoxidable fijados a la cubierta, que las dividen en tres tramos de 3 m. Las cargas horizontales de viento se transmiten al forjado inferior y a la estructura de cubierta mediante una serie de seudo-celosías verticales de acero inoxidable, denominadas "*kipper truss*", dispuestas coincidiendo con las vigas principales de la cubierta.

Figura 7. Vista interior del edificio con la fachada tipo A-1.

Las seudo-celosías "*kipper truss*", de 12.74 m de altura, se encuentran en un plano perpendicular al del vidrio, con su eje coincidiendo con el plano de la fachada. Se trata de unas seudo-celosías, que en adelante denominaremos celosías por facilidad, de canto variable en forma de vientre de pez, que carecen de diagonales, siendo los cordones simples redondos de 32.7 mm de diámetro de acero inoxidable 1.4542 UNE EN 10088. Los montantes, fabricados en acero inoxidable moldeado CF8M según ASTM A743, coinciden con las cuatro correas intermedias. El canto de la celosía es de 1160 mm para el primer y el cuarto montantes y de 1760 mm para el segundo y tercer montantes.

En su extremo inferior, los redondos que forman los cordones de la celosía coinciden en una pieza especial en forma de V, fabricada mediante forja de acero inoxidable 1.4462 UNE EN 10088, que aloja en su parte inferior un bulón destinado a articular la pieza en su unión al forjado. Esta unión se completa con una placa base de acero al carbono de 50 mm de espesor, con orejetas de 30 mm, fijada a la estructura de hormigón mediante cuatro pernos M33 de calidad 8.8.

En su extremo superior, los redondos que forman los cordones de la celosía coinciden en otra pieza especial, fabricada igualmente mediante forja de acero inoxidable 1.4462 UNE EN 10088, que recibe al mismo tiempo a la correa más elevada y a un par de barras Ø 37.9 de acero 1.4542 UNE EN 10088 que permiten fijar la celosía a la estructura de cubierta mediante horquillas y orejetas atornilladas (Figura 8).

Esta vinculación entre fachada y cubierta, junto con la configuración de los pilares inclinados, conduce a una fuerte interacción entre ambos elementos bajo la acción de las sobrecargas. Los movimientos de la cubierta introducen esfuerzos en los elementos verticales de las fachadas, que a su vez trabajan arriostrando a la cubierta, lo que obliga a diseñar ambas estructuras de forma conjunta.

El diseño de la parte superior de las celosías permite una regulación precisa de su posición, mediante el roscado de las barras superiores, para cumplir las tolerancias de montaje exigidas por la propiedad para el muro cortina. Este mecanismo ha permitido corregir los errores de posición de la cubierta y las diferencias entre los movimientos de tesado esperados y reales.

El planteamiento estructural del muro cortina tipo A-5 es similar al del tipo A-1 (Figura 9). En este caso el muro cortina queda dividido por un forjado intermedio y su altura total es menor, por lo que el número de montantes se reduce a 2 y el de correas horizontales a 3. Las celosías de fachada atraviesan el forjado intermedio perdiendo la forma en vientre de pez, de manera que quedan reducidas a un romboide por cada planta.

Figura 8. Detalle de "*kipper truss*", piezas especiales y unión a la cubierta-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

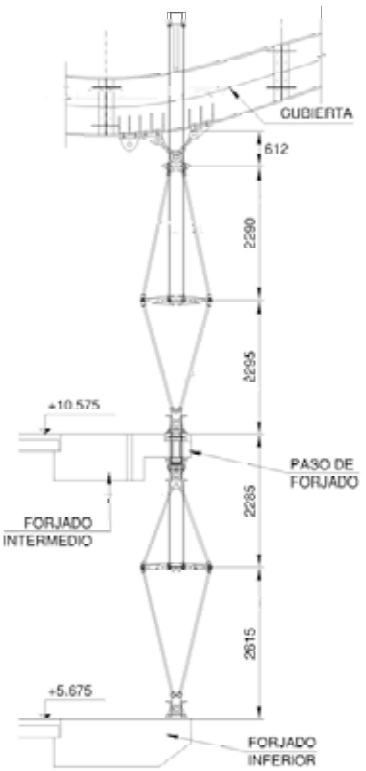


Figura 9. Muro cortina tipo A-5. Sección Tipo.

El paso de forjado se resuelve mediante un tubo de acero al carbono cromado, abrazado por dos chapas taladradas solidarias con el mismo, que permiten transmitir exclusivamente cargas horizontales a la estructura de hormigón.

Además de los requisitos habituales de calidad de los materiales, trazabilidad, etc, se ha diseñado un plan de ensayos especifico para las piezas de acero inoxidable de las fachadas, destinado a garantizar su integridad interna y superficial. Así, por ejemplo, durante la ejecución se han radiografiado el 100% de las zonas de responsabilidad estructural de las piezas de acero inoxidable obtenidas por fundición en molde de arena y el 25% de las obtenidas por forja.

La resistencia de las piezas y su ensamblaje a escala real se ha verificado mediante un plan de ensayos mecánicos de rotura de conjuntos. Los ensayos se han agrupado en tres series:

- Una serie de 5 conjuntos por métrica de las uniones roscadas barra manguito, variando la longitud roscada entre 25 y 35 mm ensayados a tracción (Figura 10).
- Una serie de 5 conjuntos de barra Ø37.9 con horquilla orejeta y basa de fijación a cubierta ensayados a tracción (Figura 11).
- Una serie de 6 conjuntos de medio montante con manguito bulonado y barra roscada Ø32.7 mm ensayados a tracción (Figura 12).

Figura 10. Muestras ensayadas de unión roscada barra-manguito.

Figura 11. Muestras ensayadas de barra Ø37.9 con horquilla de fijación a cubierta.

Figura 12. Muestra ensayada de medio montante con manguito bulonado y barra roscada Ø32.7 mm.

Los resultados han sido en todos los casos satisfactorios, validando por tanto el diseño y la fabricación de las piezas de acero inoxidable y sus uniones. En las uniones roscadas se ha verificado la longitud mínima roscada prescrita en el proyecto para garantizar una rotura dúctil de la estructura, por estricción en las barras (Figura 13). Los ensayos han permitido igualmente validar el diseño y los procesos de fabricación de orejetas y uniones bulonadas de horquillas y montantes, fabri-

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

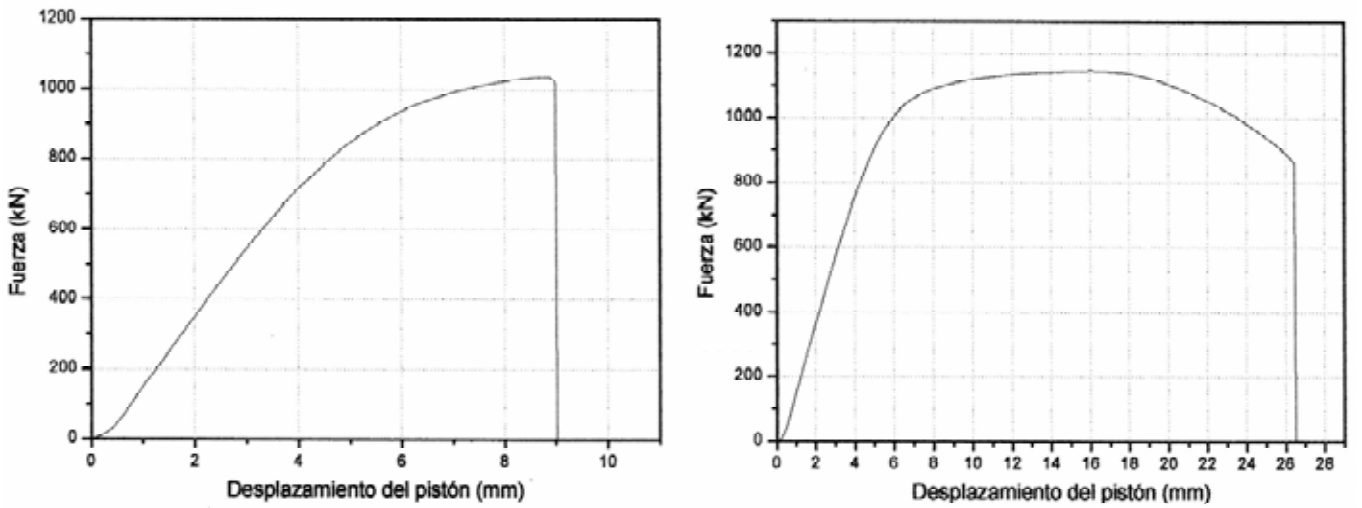


Figura 13. Curvas carga desplazamiento de las muestras B2-1 (rotura frágil por el filete de rosca) y B2-2 (rotura dúctil por estricción en la barra).

cados respectivamente por forja y por moldeo, comprobándose la resistencia y ductilidad de todos los elementos.

3. CONDICIONANTES DEL PROYECTO

Debido a la extremada esbeltez de los cordones de las celosías *"kipper truss"* se ha considerado necesario que trabajen a tracción para todas las hipótesis de carga de la estructura en estado límite último. Para lograr esto, es necesario dotar a los *"kipper truss"* de una tracción previa de entre 363 y 542 kN por celosía dependiendo su tipo y su ubicación, lo que ha hecho necesario diseñar un proceso de tesado específico.

El proceso de pretensado, que condiciona sustancialmente a la estructura de cubierta, ha obligado a introducir contraflechas tanto en las vigas de cubierta como en las celosías de fachada. Éstas últimas se han fabricado con una longitud 19 mm inferior a la teórica para las celosías tipo A-1 y 11 mm para las tipo A-5, para tener en cuenta su alargamiento propio al entrar en carga.

Con base en los modelos de cálculo empleados en el dimensionamiento de la estructura, se ha previsto la posición de los puntos de fijación y las longitudes de las barras de todas y cada una de las celosías de fachada en el momento de su colocación, en orden a agilizar las operaciones de montaje y nivelación de las mismas.

Debido a las exigencias arquitectónicas en cuanto a acabados de las vigas de hormigón dónde se anclan las celosías de fachada y en cuanto a las tolerancias de posicionamiento de la base de estas celosías, se ha optado por realizar el tesado de forma indirecta, predeformando la estructura de cubierta con carácter previo al montaje de la fachada. Lógicamente esto supone introducir fuerzas de tesado superiores a las definitivas de las celosías de fachada, tal como se expone más adelante.

El proceso de tesado se ha diseñado con unas especificaciones de tolerancia en las fuerzas finales de las celosías de ±3.5% del valor prescrito para la media de cada fachada y del ±7% de diferencia máxima en una celosía individual. Estas exigencias han obligado a adaptar el procedimiento según los resultados que se han ido obteniendo en primeros tesados y las particularidades de cada nuevo módulo a tesar.

El proceso de montaje de las celosías de fachada queda dividido en tres fases que son:

1. Tesado de la estructura de cubierta con una fuerza establecida a priori.

2. Montaje y fijación de las celosías de fachada vinculándolas a la cubierta y al forjado inferior.

3. Transferencia de carga a las celosías por destesado de la estructura.

Las operaciones de tesado y transferencia han sido ejecutadas por Mekano 4 a total satisfacción del cliente [4].

El tesado se puede realizar introduciendo un desplazamiento impuesto en la cubierta o bien una fuerza conocida, si bien es preferible éste último método dado que minimiza la influencia de los errores de estimación de las rigideces de cubierta y celosía en la fuerza final obtenida. Efectivamente, reduciendo el modelo espacial de la estructura al caso de un solo punto de tesado, la fuerza final N obtenida en el tirante, de rigidez k_2, a partir de una fuerza de tesado P aplicada en la cubierta, de rigidez k_1 resulta:

$$N = \frac{1}{1 + k_1 / k_2} \cdot P$$

Análogamente, si el tesado se realiza mediante un desplazamiento impuesto de la cubierta de valor δ, la fuerza obtenida en la celosía de fachada alcanza el valor:

$$N = \frac{k_1}{1 + k_1 / k_2} \cdot \delta$$

Con esta formulación es fácil comprobar cómo un rango de variación en la estimación de las rigideces de cubierta y

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

fachadas del ±10%, produce un error máximo en la fuerza final de la celosía del ±6%, si el tesado se realiza por fuerza o del ±10% si se realiza por desplazamientos.

Por otra parte, la continuidad y la flexibilidad de la estructura de cubierta suponen una interacción entre las distintas celosías de fachada desaconsejando el tesado secuencial de las mismas. El tesado de una única celosía de fachada descargaría parcialmente las adyacentes, al aumentar la carga global que soporta la cubierta, obligándola a descender.

Por ello se ha realizado el tesado simultáneo de todas las celosías de cada uno de los 18 módulos independientes en que se ha dividido la cubierta, aprovechando las juntas de dilatación del edificio. En estas juntas se ha realizado un montaje parcial de los elementos que vinculan los módulos adyacentes para aislarlos mecánicamente. Este aislamiento se ha logrado colocando tornillos modificados en número mínimo para soportar el peso propio de la estructura, de forma que las uniones de los elementos que apoyan a uno y otro lado de la junta, resultan articuladas. El número máximo de puntos de tesado simultáneo que resultan de este planteamiento es de 16, en los que se han controlado las fuerzas introducidas mediante gatos hidráulicos y los movimientos relativos cubierta forjado mediante transductores lineales de desplazamiento.

Los 18 módulos a tesar se dividen en 8 tipos según sean extremos, interiores, cortos, largos, de dique ó de anexo. En la mayoría de estos módulos las fachadas A-1 se sitúan de forma simétrica respecto al eje Norte Sur de la cubierta, de forma que las componentes horizontales de las reacciones de los pilares frente a las cargas de tesado se compensan. En estos módulos, los movimientos de la cubierta durante el tesado son principalmente verticales, con valores comprendidos entre 65 y 85 mm para unas cargas de tesado entre 775 y 907 kN. Durante la transferencia de carga la cubierta recupera en torno a 22 mm y las celosías de fachada quedan pretensadas con una carga de 542 kN.

En los módulos de la zona central del edificio, desaparece la fachada tipo A-1 del lado Este, dónde se sitúa el anexo, de forma que se pierde la simetría respecto al eje Norte Sur. En estos módulos, la componente horizontal de la reacción de los pilares frente a las cargas de tesado no se compensa por lo que se prevén movimientos horizontales de hasta 104 mm junto con unos movimientos verticales comprendidos entre 119 y 150 mm en la fachada Oeste (tipo A-1) y entre 44 y 60 mm en la fachada Este (tipo A-5). En estos módulos las cargas de tesado alcanzan valores comprendidos entre 656 y 917 kN para la fachada tipo A-1 y valores entre 434 y 491 kN para la fachada tipo A-5 que requiere menor pretensado por sus especiales características. Durante la transferencia de carga la cubierta recupera en torno a 22 mm en las fachadas tipo A-1 y 14 mm en las fachadas tipo A-5 que quedan pretensadas con una carga de 367 kN por celosía.

Los controles durante el proceso han sido exhaustivos en orden a garantizar la fuerza transferida a las celosías y la integridad estructural de la cubierta en todo momento.

Durante la operación de tesado se ha controlado que las fuerzas especificadas se introducen en la cubierta de forma proporcional, con desequilibrios inferiores al 3.5% y que los desplazamientos se aproximan a los previstos con un margen de error medio del 10% e individual del 20%.

Durante la trasferencia de carga se han controlado además de las fuerzas en los gatos y los desplazamientos de la estructura, las fuerzas introducidas en las celosías de fachada que han sido convenientemente instrumentadas mediante galgas extensométricas en porcentaje variable entre el 25% y el 100% según el módulo.

Las lecturas de las galgas se calibraron con un ensayo realizado en laboratorio, sobre una barra idéntica a las de las celosías de fachada, dado que su comportamiento elástico no resulta estrictamente lineal. Los resultados de las medidas realizadas directamente sobre las celosías de fachada, se aproximaron notablemente a las previsiones basadas en los desplazamientos reales medidos durante el tesado y la transferencia.

Las fuerzas finalmente obtenidas en las celosías de fachada se han situado en el orden de lo exigido, con errores puntuales inferiores al 10% en los módulos más complejos.

4. EJECUCIÓN Y MONTAJE

El montaje de la estructura de cubierta se ha realizado conforme a tres procedimientos distintos según la zona del edificio y el subcontratista encargado de los trabajos. En el dique Norte, MASA ha optado por un montaje lateral con grúas pesadas, izando módulos premontados en el suelo, de hasta 21.5 x 9.0 m y 29 t de peso. En el anexo de la zona central, este mismo subcontratista ha recurrido al ripado de módulos de 72x9 m empleando un sistema de patines sobre teflón de ALE Lastra (Figura 14).

Figura 14. Ripado de un módulo de 9x72 m mediante sistema de patines sobre teflón.

Por su parte, Horta, el otro gran subcontratista de estructura metálica de cubierta, ha optado en el dique Sur y en el lado Oeste de la zona central, por un sistema de carretones que proporcionan una plataforma óptima de trabajo a la altura de la cubierta, lo que finalmente ha supuesto una mayor garantía de rapidez en el proceso (Figura 15).

El pretensado de las fachadas se logra deformando la cubierta con carácter previo al montaje de los elementos de

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Figura 15. Montaje mediante carretones-plataforma en el dique sur.

la fachada. La predeformación de la cubierta se introduce por medio de un tirante provisional anclado al forjado de hormigón, por cada celosía de fachada a tesar. Estos tirantes están formados por una barra tipo MK Y1050 de 47 mm de diámetro, situada a 1.10 m del eje de la celosía de fachada hacia el interior del edificio en el caso del muro tipo A-1 y a 0.80 m en el caso del muro tipo A-5. Estos tirantes están provistos de un sistema que permite reducir su longitud mediante un gato hidráulico de doble efecto, capaz de aplicar 1500 kN (Figura 16).

Figura 16. Tirante provisional junto a celosía de fachada A-1.

Junto a cada tirante provisional se monta un transductor lineal de desplazamiento que informa del movimiento relativo entre la cubierta y el forjado de hormigón, con una precisión de 0.5 mm (Figura 17). Con este sistema de medida directa de los desplazamientos de la estructura, se evitan los errores en la estimación de los alargamientos del tirante provisional por deformación de las barras traccionadas y de sus conexiones, que se cometerían si se midiese simplemente la carrera del gato.

Figura 17. Detalle de transductor lineal de desplazamiento junto al gato de tesado.

Figura 18. Autómata para la realización y el control del tesado.

Los gatos de tesado se alimentan mediante una central hidráulica gestionada por un autómata (Figura 18), en función de los datos registrados por los transductores de presión y de desplazamiento. Este sistema permite realizar la operación hasta en 16 puntos con fuerzas y desplazamientos distintos, de forma simultánea, introduciendo las fuerzas deseadas de forma proporcional y controlando que los desplazamientos no superen los márgenes establecidos. Alternativamente el sistema permite alcanzar los desplazamientos deseados, controlando que las fuerzas se sitúan en un rango especificado respecto de las previstas.

La operación de tesado comienza por el montaje de los tirantes provisionales y los elementos necesarios para su

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

accionamiento. A continuación se cuelgan las celosías de fachada de la cubierta que debido a las contraflechas, dejan una separación suficiente con el forjado inferior. Parte de las celosías de fachada se instrumentan mediante galgas extensométricas para medir el axil realmente transferido.

Una vez colgadas las celosías de fachada se procede al descenso de la cubierta mediante la aplicación de las fuerzas previstas en los tirantes provisionales, en un proceso escalonado y controlado.

Tras el descenso de la cubierta se procede a regular la posición de las celosías de fachada con un estricto control topográfico y a su fijación en el forjado, para a continuación transferir la carga de los tirantes provisionales a las celosías, descargando los gatos de forma controlada al tiempo que se van tomando lecturas de los axiles en las celosías de fachada instrumentadas.

El sistema de tesado permite realizar las operaciones de tesado y transferencia en menos de 1 hora de forma que la operación completa se puede realizar en una jornada disponiendo de tiempo suficiente para montar y nivelar las celosías de fachada.

5. CONCLUSIONES

La construcción de la cubierta y fachadas del Edificio Satélite de la ampliación de Barajas, ha requerido por su complejidad técnica de la intervención de un equipo multidisciplinar, que ha permitido la consecución de los objetivos en un tiempo record, completando un total de 12.000 t de acero estructural en cubierta y un total de 25.000 m^2 de muros cortina en el plazo de apenas 2 años.

El tesado de las fachadas ha requerido una amplia preparación analítica previa con la elaboración de múltiples modelos de la estructura, a los que se ha introducido variaciones en las condiciones de contorno y rigidez, tanto para fijar las cargas de tesado y los movimientos previstos, como para determinar el previsible rango de variación de los mismos y su incidencia estructural. En lo tocante a la ejecución, se ha realizado con un equipo altamente tecnificado y un control exhaustivo para obtener la fuerza necesaria en las celosías de fachada, con la precisión requerida, sin necesidad de realizar escalones parciales de tesado ni tediosos retesados individuales. Para lograr este objetivo se ha diseñado un procedimiento de tesado específico, que se ha ido adaptando en función de los resultados obtenidos, contando con un equipo de tesado multipunto que permite la actuación simultánea e independiente de 16 gatos hidráulicos de 1500 kN.

La minuciosa preparación previa y el cuidado y control en la ejecución del proceso de tesado, han permitido lograr los objetivos sin incidentes y sin prolongar el plazo total de la obra condicionado por la fabricación y montaje de la estructura de cubierta y de las celosías de fachada.

6. AGRADECIMIENTOS

- UTE EDIFICIO SATELITE, DRAGADOS Y OHL constructor.
- ALEPH consultores S.L., proyecto y asistencia técnica a obra.
- HORTA estructura metálica de cubierta.
- MASA-JOAMA estructura metálica de cubierta.
- MEKANO4, MEKANO INSTRUMENTACIÓN tesado e instrumentación de fachadas.
- UTE FACHADAS ED. SATELITE, ESTRUMAHER INASUS Y VICAL estructura de fachadas tipo A1 y A5 y carpintería y acristalamiento general del edificio.

REFERENCIAS

[1] Lamela, Carlos; Moya, Paz: “Conceptos arquitectónicos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[2] Viñuela Rueda, Luis; Martínez Salcedo, José: “Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[3] Fernel Fernández, José Pedro: “Edificio Satélite de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[4] Fernel Fernández, José Pedro: “Aparcamiento y accesos de la nueva Área Terminal”. Hormigón y Acero nº 239, 1er trimestre 2006.

[5] Rucabado, R; Calvo, M.A.: “Tesado multipunto en el Edificio Satélite”. ACHE, III Congreso de puentes y estructuras de edificios, Vol. V, págs. 2961-2971, Zaragoza, 14-17 Noviembre 2005.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Comprobación de un tablero mixto

Monografía M10 de ACHE

Por: Pilar Crespo Rodríguez
Coordinadora del Grupo de Trabajo

En los últimos años, han ido publicándose diferentes partes de los Eurocódigos con categoría de Normas Europeas EN. Entre ellas se encuentran la parte General y la parte de Puentes del Eurocódigo 4, dedicado a las *Estructuras mixtas*. Estos dos documentos, junto con el Eurocódigo 0, *Bases de cálculo*, el Eurocódigo 1, *Acciones*, y otras partes del Eurocódigo 2, *Estructuras de hormigón* y del Eurocódigo 3, *Estructuras de acero*, constituyen un cuerpo normativo homogéneo para el proyecto de puentes mixtos, que tiene, hay que recordarlo, carácter voluntario.

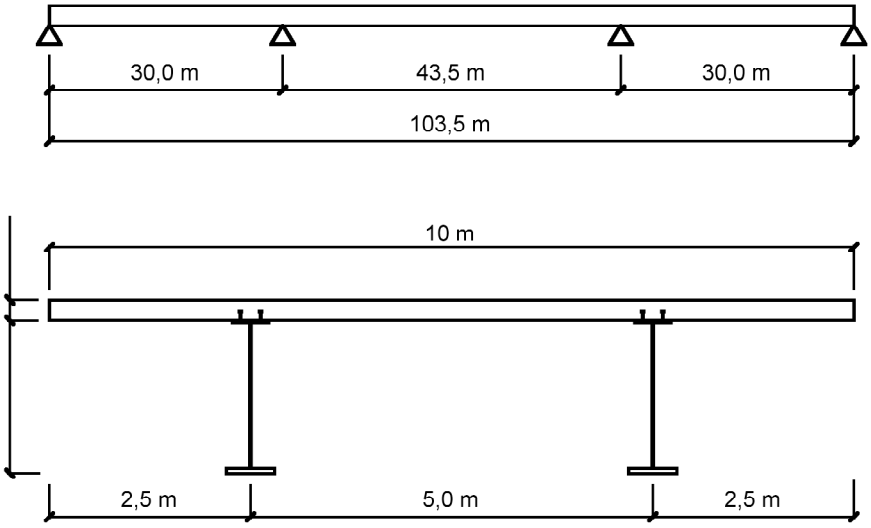
La reglamentación española para el proyecto de un puente mixto de carretera está constituida por la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (IAP) y las *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos de carretera* (RPX), con referencia a la *Instrucción de Hormigón Estructural* (EHE).

La existencia de las mencionadas normas EN, con sus similitudes y sus diferencias respecto a los correspondientes documentos españoles, es lo que animó al grupo de trabajo a realizar el doble ejercicio de cálculo que se recoge en esta monografía. Las bases de cálculo son análogas en ambos conjuntos normativos. Sin embargo, entre el conjunto normativo español y el de los Eurocódigos existen diferencias, cuya repercusión sobre el dimensionamiento de los puentes está aún por determinar y sólo podrá ser establecida mediante estudios comparativos de puentes de luces y tipologías variadas, dimensionados por ambos caminos.

La verificación de un tablero mixto con la normativa española y con los Eurocódigos ha sido el objetivo del grupo de trabajo GT5/3 dentro de la Comisión 5 de ACHE. El tablero elegido para realizar la comparación es un tablero de doble viga, por ser ésta una tipología ampliamente tratada en la parte de Puentes del Eurocódigo 4 y a la que se pueden aplicar con relativa sencillez las prescripciones de los Eurocódigos.

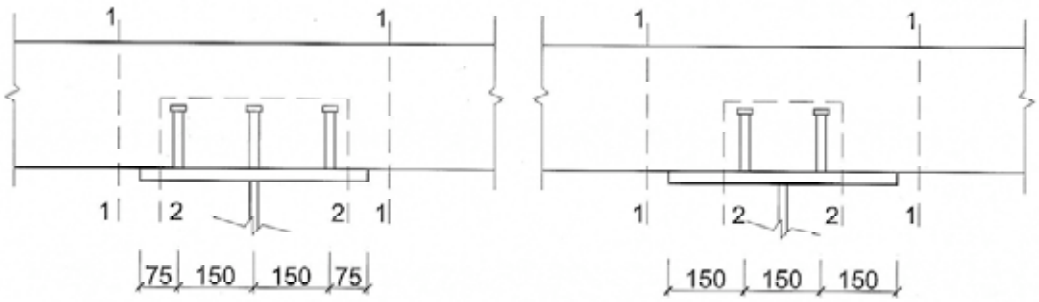
La preparación del documento se ha llevado a cabo en dos etapas. En la primera, a partir de unos criterios establecidos conjuntamente, cada uno de los miembros del grupo desarrolló los cálculos de alguno de los apartados, manteniendo el paralelismo entre la parte desarrollada según normativa española y la parte elaborada con los Eurocódigos. En la segunda etapa, se procedió a la revisión del conjunto de los cálculos por parte de todos los miembros del grupo para asegurar su coherencia final. En esta segunda etapa, se hizo también una revisión minuciosa de las referencias a las diferentes partes de los Eurocódigos, labor que tuvo cierta complicación puesto que, a lo largo del tiempo en que se desarrolló el trabajo, se iban recibiendo actualizaciones de los Eurocódigos de forma casi continua.

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025



La monografía, además de un apartado de **Introducción** y un apartado en el que se explica el **Alcance del estudio**, consta de dos partes: **Parte I**, en la que se recoge la verificación del tablero mixto paso a paso de acuerdo con la normativa española; y, la **Parte II**, en la que se recoge la verificación del mismo tablero según los Eurocódigos. Las dos Partes están estructuradas de la misma forma: a partir de las acciones y los modelos de cálculo definidos según los criterios de la normativa correspondiente, se determinan los esfuerzos y desplazamientos, y se desarrolla la verificación de los estados límite últimos y los estados límite de servicio, terminando con el dimensionamiento de la conexión. En ambas Partes, se sigue la misma numeración de apartados para facilitar el contraste de resultados.

Estaba entre los deseos de los miembros del grupo de trabajo incluir en la monografía un análisis comparativo de los resultados. Sin embargo, además del interés en no demorar por más tiempo la publicación, se consideró que la obtención de conclusiones debía hacerse después de un estudio más amplio que incluyera puentes con diferentes tipologías, dimensiones y características. Esperamos que este documento sirva como primer paso para alcanzar ese objetivo.



Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

TESIS DOCTORAL

Estudio del comportamiento a flexión y cortante de puentes de dovelas de hormigón con pretensado exterior y junta seca

Por: José Turmo Coderque
Directores: Ángel Carlos Aparicio Bengoechea
Gonzalo Ramos Schneider
Universitat Politècnica de Catalunya

INTRODUCCIÓN

Los puentes de dovelas prefabricadas de hormigón con pretensado exterior y junta seca se asocian a un proceso constructivo que pasa por ser el más rápido en su género, con un rendimiento mínimo de dos vanos por semana. Para la construcción de cada vano, las dovelas se disponen una junto a la otra suspendidas de una viga o apoyadas en una cimbra móvil y son ensambladas con pretensado exterior. En general no es necesaria la aplicación de una resina epoxy entre caras de dovelas. Son precisamente los puentes de dovelas con juntas secas sin resina con pretensado exterior los que son objeto de este estudio. Su característica más significativa es que no existe armadura adherente, ni activa ni pasiva, atravesando la junta.

Ante cargas de servicio, estos puentes se dimensionan para que no se alcance el estado límite de descompresión, permaneciendo las juntas cerradas con una compresión mínima de 0,5 MPa. Cuando la sobrecarga aumenta hasta alcanzar los niveles de Estado Límite Último las juntas se abren ostensiblemente Como no hay armadura pasiva que cruce la junta, los momentos flectores tienen que ser resistidos bien por más armadura activa bien por mayores tensiones iniciales en el acero.

La transferencia de cortante a través de juntas abiertas es un tema más complejo. La teoría universalmente aceptada propone que el cortante es transmitido a través de las juntas por forjados y almas mediante dos mecanismos cualitativa y cuantitativamente diferentes. El primero recoge el efecto del apoyo de las llaves conjugadas de las que normalmente están provistas estas juntas. El segundo representa la fuerza de rozamiento que surge cuando dos superficies planas y comprimidas intentan deslizar la una contra la otra y que es proporcional a las compresiones actuantes.

Aunque los mecanismos de transmisión de cortante a través de las juntas secas son cualitativamente bien conocidos, los distintos autores no coinciden en su cuantificación. La aplicación de las formulaciones propuestas conduce a valores del cortante último respuesta cuyos resultados varían en proporción de dos a uno. Algunas de estas fórmulas provienen de trabajos teóricos. Otras son fruto de trabajos experimentales en los que se ha estudiado profusamente el comportamiento a nivel probeta de una única llave, asumiendo que la resistencia de una junta con varias llaves es la suma algebraica de las resistencias de cada una de las llaves. Los ensayos realizados en juntas con llaves múltiples son muy reducidos en número.

Otro de los puntos controvertidos en la evaluación de la resistencia a cortante de una junta es la cuantificación de la parte lisa comprimida de la sección que es susceptible de transmitir cortante, acotando algunos autores la parte de forjado capaz de transmitir cortante únicamente a la zona próxima a las almas. Además, los criterios de armado de la dovela en la proximidad de la junta abierta enfrentan a los investigadores, defendiendo algunos autores la necesidad de disponer una armadura para suspender el cortante en la proximidad de la junta abierta.

OBJETIVOS

El objetivo global de este trabajo es profundizar sobre el comportamiento estructural de los puentes de dovelas de hormigón con pretensado exterior y junta seca, evaluando su capacidad resistente a flexión y cortante combinados, para lo cual se definen los siguientes objetivos parciales:

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

– Obtención de resultados experimentales para interpretar la diferente y dispar formulación existente en la normativa y la literatura para evaluar la capacidad última de las llaves conjugadas y de las juntas en las que éstas se encuentran, determinando asimismo cuál es, en las juntas de secciones cajón, el ancho del forjado susceptible de transmitir cortante por rozamiento y verificando la hipótesis de que la resistencia a cortante se alcanza simultáneamente en todas las llaves de manera que la resistencia de la junta es la suma de la resistencia de cada llave.

– Estudiar el comportamiento de la junta cuando se incluyen fibras en la matriz de hormigón y registrar los beneficios inducidos en resistencia y ductilidad. Verificar si estructuralmente es factible la sustitución de toda o parte de la armadura convencional en este tipo de vigas tras la inclusión de fibras en el seno del hormigón.

– Obtención de resultados experimentales con los que poder calibrar un modelo de elementos finitos que permita un estudio numérico fiable de los puentes de estas características. Validar con ellos un modelo y aplicarlo al estudio de diversos ejemplos a fin de conocer el comportamiento de estas estructuras en servicio y en rotura, extrayendo conclusiones de proyecto acerca de sus criterios de diseño, de sus mecanismos resistentes y de los criterios de armado; justificando científicamente si es necesario o no incluir la armadura de suspensión en las proximidades de la junta abierta.

METODOLOGÍA

Una vez realizada una exhaustiva investigación bibliográfica y tras ser planteados los objetivos de la tesis doctoral, se diseñaron y desarrollaron las siguientes etapas de la investigación:

– Ensayo a cortante de un total de ocho paneles (165cm^{x}100cm^{x}10cm) que intentaban reproducir el comportamiento de las almas de los puentes de dovelas. Cuatro paneles eran de hormigón convencional y otros cuatro de hormigón reforzado con fibras de acero. Con estos ensayos se evaluaba la influencia del tipo de material, de las compresiones y de la geometría de la junta en el valor de la resistencia a cortante de la junta.

– Ensayo a cortante de un total de seis vigas con juntas secas conjugadas de 0,60 m de canto y 7,60 m de longitud, tres de ellas de hormigón convencional (PC) y otras tres de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC). Los ensayos tenían como objetivos el verificar el comportamiento de la junta abierta en la estructura ante solicitaciones de cortante, el cuantificar la influencia del axil de pretensado en la resistencia de la junta y de la estructura, estudiar la eficacia de la armadura de cortante próxima a la junta abierta y comprobar la colaboración del forjado comprimido a la hora de transmitir cortante en estas estructuras.

– Puesta a punto y calibración de un modelo de elementos finitos capaz de estudiar el comportamiento a flexión y cortante de estas estructuras y capaz de modelizar adecuadamente el comportamiento no lineal del hormigón en compresión, los efectos de la no linealidad geométrica, el deslizamiento de los cables en los desviadores y la fisuración en el seno de la dovela. La calibración del modelo de junta y del modelo estructural se realizaba empleando los resultados de los ensayos de paneles y de vigas.

– Aplicación del modelo al estudio de puentes isostáticos e hiperestáticos. En esta etapa se verificaba cual es el criterio (ELS o ELU) que guía el dimensionamiento del pretensado en este tipo de puentes, se comparaba el diferente estado tensional presente en la estructura al alcanzarse el ELU definido por las distintas normativas, se evaluaba la influencia del nivel de pretensado en el coeficiente de seguridad de la estructura, se identificaba el efecto arco como mecanismo conjunto de resistencia a flexión y cortante en estas estructuras y se descartaba la necesidad de disponer armadura de suspensión en la proximidad de la junta abierta.

CONCLUSIONES

Fruto de la aplicación de una metodología original se han alcanzado innovadoras conclusiones entre las que cabe destacar:

– Identificación de la fórmula para evaluar la resistencia a cortante de la junta que mejor predice los resultados de los ensayos de la tesis y los encontrados en la literatura. Verificación experimental y numérica de la hipótesis de que la resistencia a cortante se alcanza simultáneamente en todas las llaves de manera que la resistencia de la junta es la suma de la resistencia de cada llave.

– En los ensayos de vigas, la rotura por cortante no es seccional, como en flexión, sino espacial. El mapa de fisuras que justifica la colocación de armadura de suspensión en la proximidad de juntas abiertas no aparece. Es más, la armadura convencional de cortante no es efectiva en estos ensayos, resistiendo las vigas provistas de cercos, esfuerzos cortantes últimos muy similares a vigas análogas sin armadura de cortante. La forma de rotura del forjado, con fisuras que lo atraviesan de lado a lado, apoya la teoría de un forjado colaborante en la transmisión de tensiones tangenciales en todo su ancho eficaz.

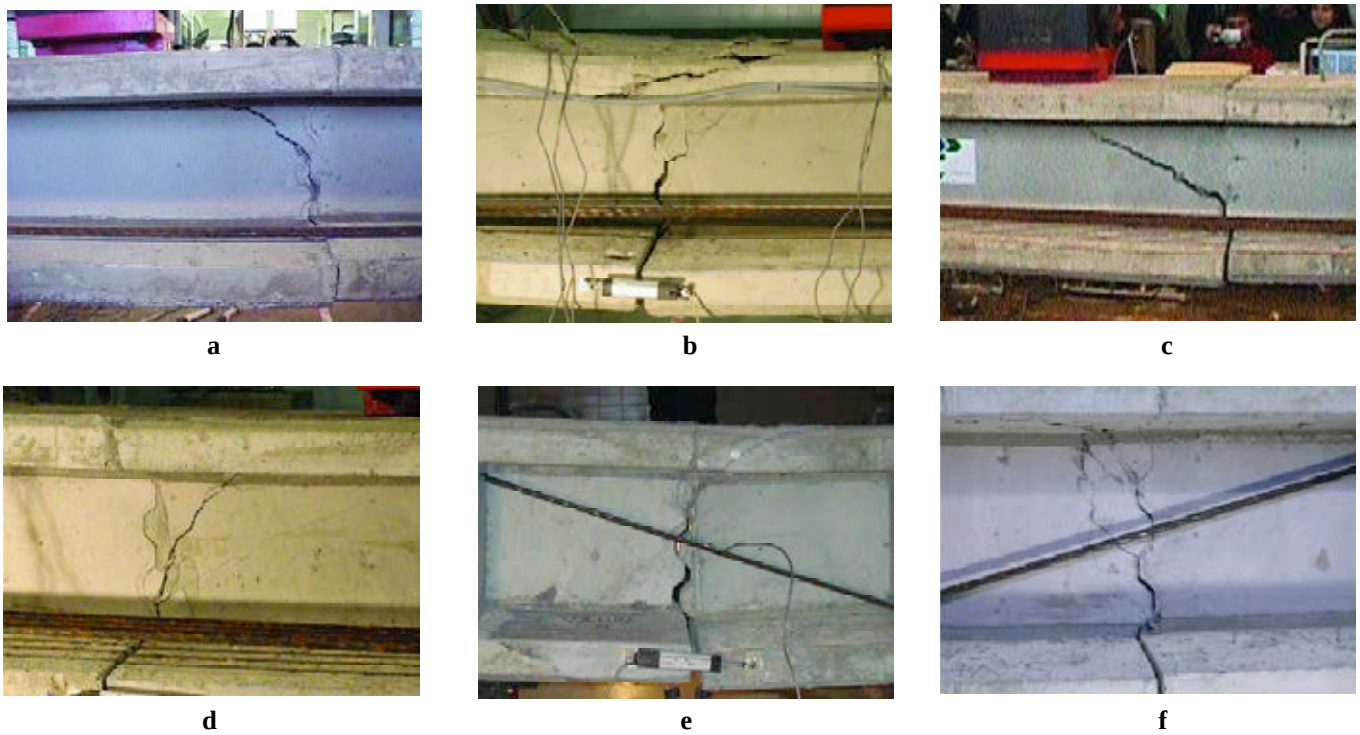
– Se enuncia por primera vez, demostrándolo experimental, teórica y numéricamente, que el efecto arco es el responsable de la transmisión del cortante en estas estructuras, estando la existencia de tensiones tangenciales asociada a la existencia de compresiones en el hormigón. No es por tanto necesario el dimensionamiento de la armadura transversal del alma con la intención de suspender el cortante en la proximidad de la junta abierta. Por otro lado, el efecto arco implica que todo el ancho eficaz del forjado es susceptible de transmitir cortante.

– De los análisis realizados se deduce que en puentes isostáticos es el ELU el que condiciona el dimensionamiento del pretensado. En puentes hiperestáticos, sin embargo, puede ser el ELS de descompresión de las juntas o el ELU el que condicione el dimensionamiento del pretensado. El dimensionamiento de este tipo de estructuras siguiendo el criterio propugnado por el EC 2 no sólo permite emplear el cálculo elástico en la determinación de esfuerzos, sino despreciar asimismo

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

el incremento de tensión de pretensado, la no linealidad del hormigón y la pérdida de excentricidad del cable en la respuesta. El dimensionamiento permitiendo que el hormigón alcance deformaciones de compresión de 0,0035 no sería viable en estructuras hiperestáticas. En caso de utilizar este criterio de dimensionamiento en puentes isostáticos habrá que disponer armadura transversal en el alma para controlar la fisuración producida por las altas tensiones tangenciales de rasante que surgen para compatibilizar las deformaciones entre un forjado extremadamente comprimido y el resto de la dovela, que no está solicitada longitudinalmente.

– Se concluye que la adición de fibras al hormigón no aumenta la capacidad de resistencia a cortante de las juntas de las dovelas, pero hace su comportamiento más dúctil y tenaz. De seguir el criterio de dimensionamiento del EC2, la inclusión de fibras podría contribuir a resistir las tensiones tangenciales generadas por el cortante de diseño no compensado por el pretensado y las inducidas por los momentos torsores, así como a controlar la posible fisuración originada por temperatura y retracción. Para resistir la flexión transversal y las fuerzas en anclajes y desviadores, sería imprescindible la colocación de armadura convencional.



Fisuración obtenida en los ensayos. V1-SFRC-35 (a); V1-PC-35 (b); V1-SFRC-70 (c); V1-PC-70 (d);V3-SFRC (e); V3-PC (f).

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025

Asociación
Científico-técnica
del Hormigón
Estructural

Secretaría: E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Estructuras. Avda. Profesor Aranguren, s/n
Ciudad Universitaria - 28040 Madrid. Tlf.: 91 336 66 98. Fax: 91 336 67 02 ♦ N.I.F.: G-28813442

Documento descargado de www.e-ache.com el 25/11/2025