

EL PUENTE DE ØRESUND LINK

FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE LOS VANOS DE LOS VIADUCTOS DE APROXIMACIÓN

Pedro Ascorbe Trian.

Ingeniero Industrial.

Dragados Off-Shore, S.A.

Antonio Milla San Juan.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Dragados Construcción.

Pascual Martínez Coalla.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Geocisa S.A. Dragados Construcción.

RESUMEN

En el año 2000 se inaugurará una vía de comunicación de 16 Km de longitud, autopista y ferrocarril, entre las ciudades de Copenhague (Dinamarca) y Malmö (Suecia) a través del estrecho de Øresund, haciendo realidad un sueño de ya más de 100 años. Para dicha vía Dragados Off-Shore está realizando los vanos de aproximación al puente atirantado, 6.7 Km, en 42 uds de 140 m y 7 uds. de 120 m. Se trata de una estructura mixta de acero y hormigón postensado. Para el diseño y la construcción se han implantado novedosos ensayos y la más avanzada tecnología para garantizar una durabilidad superior a 100 años en condiciones ambientales muy severas. Los trabajos de construcción se iniciaron en 1995 y está prevista su inauguración en el segundo semestre del 2000. El Øresund Link está compuesto de una autopista para el tráfico rodado con un total de cuatro carriles de circulación más dos de emergencia y dos vías para el ferrocarril. La longitud total es de algo más de 16 km., extendiéndose desde la costa danesa en Kastrup (aeropuerto de Copenhague) hasta la costa sueca de Lenacken (proximidades de la ciudad de Malmö).

ABSTRACT

The road and rail bridge, 16 km. long, over the Straits of Øresund between Copenhagen (Denmark) and Malmö (Sweden) is due to be inaugurated in the year 2000. Dragados Off-shore is constructing the bays of approach to the suspension bridge, of 6.7 km., in 42 units of 140 m. and 7 units of 120 m. The structure is of stressed steel and concrete, and the latest technology and testing have been applied in the design and construction to ensure the permanence of the bridge for more than one hundred years in very severe climatic conditions. Construction was started in 1995 and is due for completion towards the end of 2000. Traffic will flow on two levels: the upper level for road vehicles will be a four-lane concrete road with two extra emergency lanes, and on the lower level a 12 m. double railtrack with a service footbridge at each end. The crucial question of developing a type of concrete suitable for the Øresund Project was solved satisfactorily; the team of experts in the technology of concrete that was formed for this purpose was unprecedented in Spain. The work of construction was put in hand in 1995 and the inauguration is due towards the end of 2000. The Øresund Link is composed of a roadway with four traffic lanes and two more for emergency and a double railtrack. The link is a little over 16 km. long, from the Danish coast at Kastrup (Copenhagen airport) to the Swedish coast at Lernacken near Malmö.

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

Recibido en ROP:
abril de 1998

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2000 se inaugurará una vía de comunicación de 16 Km de longitud, para autopista y ferrocarril, entre las ciudades de Copenhage (Dinamarca) y Malmö (Suecia) a través del estrecho de Øresund, haciendo realidad un sueño de hace ya más de 100 años. Para dicha vía Dragados Off-Shore está realizando los vanos de los viaductos de aproximación al puente atirantado de 6.7 Km, en 42 uds de 140 m y 7 uds. de 120 m. Se trata de una estructura mixta de acero y hormigón postensado.

Para el diseño y la construcción se han implantado novedosos ensayos y la más avanzada tecnología para garantizar una durabilidad superior a 100 años en condiciones ambientales muy severas.

La idea primitiva de la construcción de una vía permanente de comunicación entre los países de Suecia y Dinamarca se remonta a 1872. Desde entonces distintos estudios preliminares se han ido sucediendo hasta que es finalmente en marzo de 1991 cuando los gobiernos danés y sueco suscriben el acuerdo para su implementación, el llamado "Øresund Link".

El diseño y construcción del Øresund Link ha sido encomendado a la empresa Oresundskonsortiet, cuyo accionariado corresponde paritariamente al gobierno danés y sueco. Los trabajos de construcción se iniciaron en 1995 y está previsto su inauguración en el segundo semestre del 2000.

2. DESCRIPCIÓN DEL ØRESUND LINK

El Øresund Link está compuesto de una autopista para el tráfico rodado con un total de cuatro carriles de circulación más dos de emergencia y dos vías para el ferrocarril. La longitud total es de algo más de 16 Km., extendiéndose desde la costa danesa en Kastrup (aeropuerto de Copenhague) hasta la costa sueca en Lernacken (proximidades de la ciudad de Malmö).

Los elementos claves de la construcción son:

- ▼ Una península artificial de 430 m en la costa danesa (kastrup)
- ▼ Un túnel sumergido de 3.510 m.
- ▼ Una isla artificial de 4.055 m. Se disponen unos diques frontales diseñados para permitir el acceso libre de las aguas en los canales de Drogden y Flinterenden.



▼ Un puente atirantado de 1.090 m con un vano central de 490 m y un gálibo en alzado de 57 m.

▼ Puentes de aproximación al puente atirantado. La longitud total es al este, en la costa sueca, de 3.740 m y al oeste de 3.014 m.

▼ Una estación de peaje en la costa sueca en Lernacken.

El diseño y construcción se está realizando bajo la premisa de que con las condiciones ambientales donde el proyecto está ubicado, temperaturas por debajo de los -20°C , ambiente marino, posible colisión de buques, impactos de masas de hielo, etc., la durabilidad del proyecto ha de ser superior a los 100 años, plazo que ha condicionado en gran medida los criterios de diseño de las estructuras.

2.1. DRAGADO, PENÍNSULA ARTIFICIAL E ISLA ARTIFICIAL

La península artificial de Kastrup (Dinamarca), de 430 m. de longitud y una superficie de $0,9\text{ Km}^2$, sirve como interconexión para los pasajeros del tren entre la estación del ferrocarril metropolitano de la estación del aeropuerto y el tren de mercancías procedente del Norte del aeropuerto. Asimismo actúa de conexión de la autopista de la península en su entrada al túnel de Drogden.



El Øresund Link. Vista aérea general del proyecto.

La ubicación en planta de la isla ha sido muy estudiada para minimizar cualquier impacto medioambiental, en particular se ha intentado preservar la fauna y la flora. El flujo de agua a través del estrecho no se verá mermado y las zonas actuales de sedimentación no se verán modificadas.

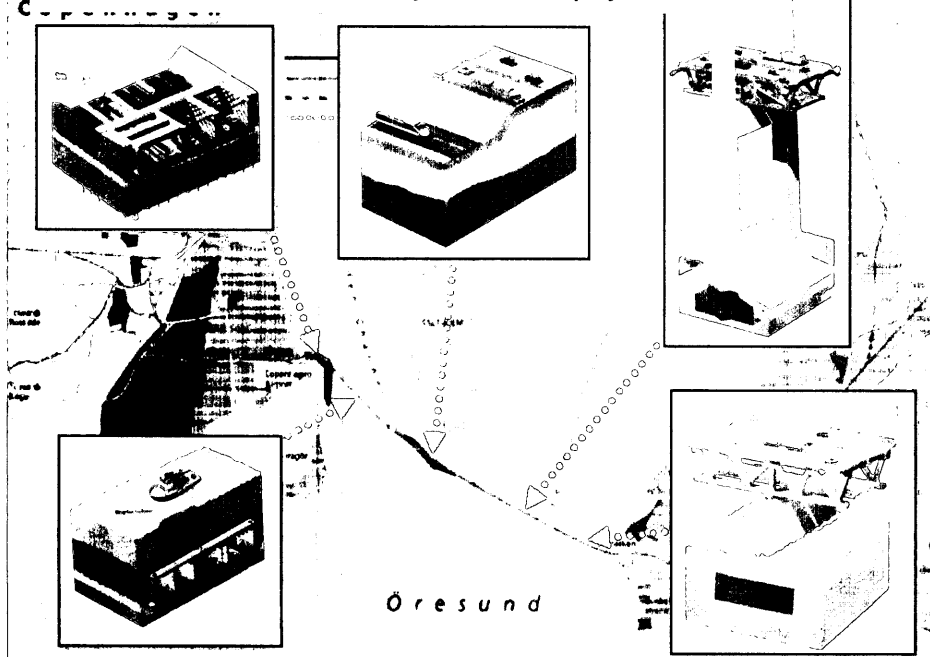
Los 4.055 m. de isla artificial acaban en sendos diques de protección que permiten el confinamiento de los materiales procedentes del dragado y absorben los esfuerzos del oleaje

La altura máxima sobre el nivel del mar es de 5.00 m. con una pendiente que se reduce gradualmente hasta +1.50 m.

La ejecución del dragado, con excepción del de las pilas y pilonos para el puente, está siendo realizado por Øresund Marine Joint Venture, consorcio formado por la empresa americana Great Lakes Dredge & Dock Co., la holandesa Ballast Nedam Dredging b.v. y la danesa Per Aarsleff A/S.

Durante todas las operaciones de dragado se monitorizan las cantidades de material derramado al lecho marino no debiendo exceder del máximo permitido, del 5 %.

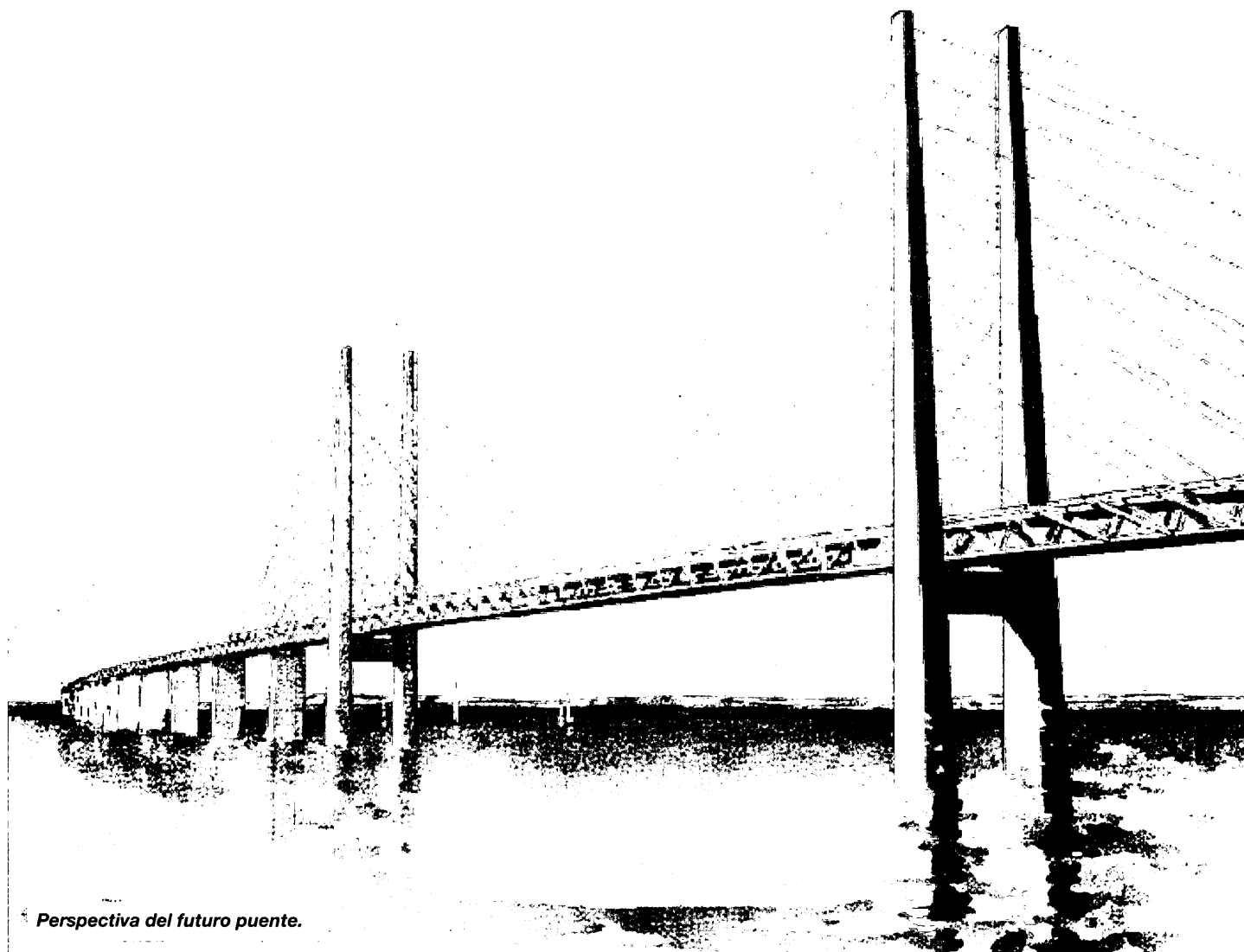
Esquema de las distintas soluciones y secciones del proyecto.



2.2. TÚNEL SUMERGIDO

El canal de Drogden será cruzado por un túnel de hormigón situado por debajo del lecho marino. La sección transversal del túnel es multicelular de cuatro espacios, dos para el tráfico rodado de 9.7 m cada uno y otros dos para el ferrocarril de 6.5 m. El canto total es de 8.75 m. Entre secciones para cada una de las direcciones de la autopista hay una galería de servicio dimensionada para funciones de vía de emergencia y de servicio del propio túnel.

La Joint Venture adjudicataria del proyecto es Øresund Tunnel Contractors formada por la empresa sueca NCC, la inglesa LAIN, la francesa DUMEZ- GTM, la holandesa BOSKALIS y la danesa E. PIHL & SÖN.



Longitudinalmente el túnel está compuesto de tres partes:

- ▼ Aproximación Oeste desde la península artificial en Kasstrup al túnel sumergido.
- ▼ Túnel sumergido compuesto de 26 elementos de 135 m (aprox.).
- ▼ Aproximación Este hasta la isla artificial.

Los 26 elementos de túnel serán prefabricados en un dique seco que ha sido específicamente construido en los alrededores de la traza para la construcción de estos elementos. Son remolcados a su punto de colocación y son fondeados en la zanja previamente dragada.

2.3. PUENTE DEL ØRESUND LINK

El trazado en planta de los 7.8 km. de puente es una curva en "C" de radio mínimo 12.800 m que ha sido integrado en el medio ambiente circundante. Numerosas perspectivas han sido realizadas para llegar a la solución definitiva. El trazado en alzado presenta una curva de 65.000 m en alzado y que confiere en su punto más alto, en el puente atirantado, un gálibo vertical para la navegación marítima de 57 m. Los calados de

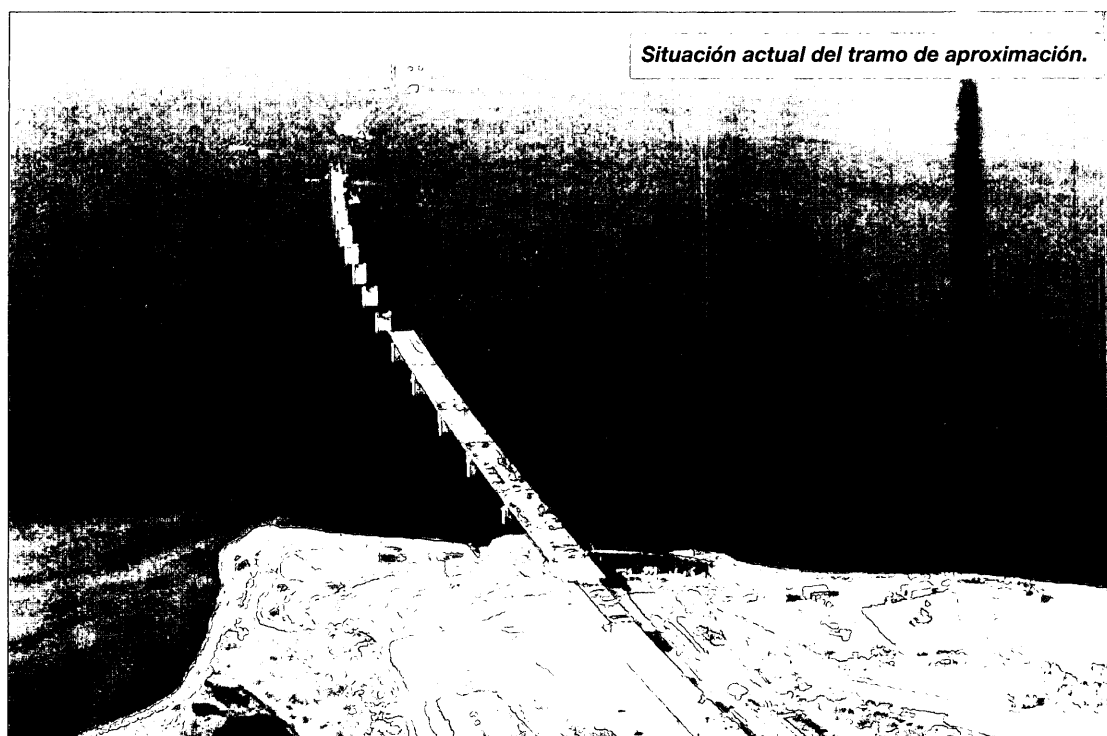
agua en el estrecho varían de 2.5 a 9.5 m. Todas las cimentaciones de los puentes de aproximación son prefabricadas y una solución mixta, prefabricada – in situ se ha realizado para el puente atirantado.

El contrato del puente que incluye tanto el puente atirantado (1.092 m.) como los vanos de aproximación (6.754 m.) ha sido adjudicado a Sundlink Contractors, Joint Venture formada por la empresa sueca Skanska (leader), la alemana Hochtief y las danesas Monberg & Thorsen y Højgaard & Schultz.

Como mediciones más relevantes se tienen:

▼ Hormigón estructural.....	280.000 m³
▼ Acero estructural	82.000 ton
▼ Acero corrugado y pretensado	60.000 ton
▼ Cable atirantado	2.000 ton

La durabilidad exigida al proyecto requiere para la elección de los materiales y de las combinaciones elegidas para los mismos, en el diseño de la mezcla de hormigón, la ejecución de la fase denominada de "pretesting", período de duración superior a los 15 meses donde se debe demostrar que se sa-



Situación actual del tramo de aproximación.

tisfacen las estrictas especificaciones del Pliego. En particular, resistencia al hielo – deshielo, a las sales, resistencia a compresión (>50 Mpa), contenido y distribución del aire ocluido ($>3.5\%$ en masa fraguada), relación agua / cemento (<0.40). Los recubrimientos de las armaduras varían de unos componentes a otros según su ubicación en el proyecto, presentando un mínimo de 50 mm y un máximo de 75 mm. La tolerancia de colocación de las armaduras es de ± 10 mm.

2.3.1 Vanos de aproximación

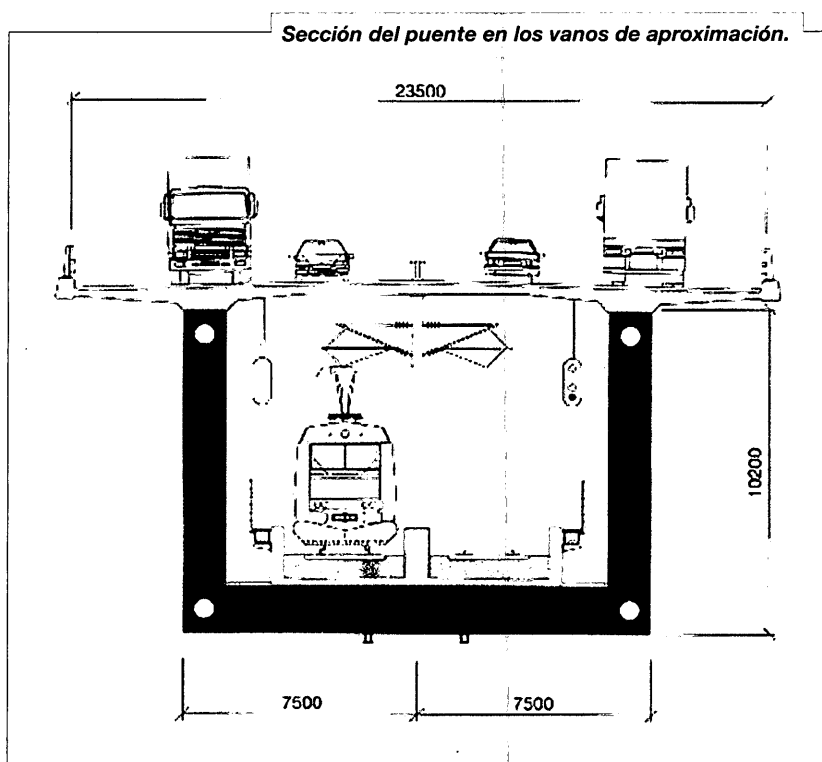
Los 6.754 m. de los vanos de aproximación se descomponen en 42 vanos de 140 m. de luz y 7 de 120 m. aprox. Se han dispuesto juntas de dilatación en los estribos, conexión con el puente atirantado y cada 6 vanos.

La sección estructural es mixta acero-hormigón. El tráfico discurre en dos niveles, en la parte superior de hormigón con una anchura de 23.5 m, cuatro carriles más dos de emergencia para el tráfico por carretera y en la parte inferior de 12 m de gálibo horizontal libre para dos vías de ferrocarril con una pasarela de servicio en cada extremo. El vuelo por lo tanto de la sección de hormigón armado es de 4.25 m, su espesor es variable con un máximo de 0.75 m en conexión con la estructura metálica y 0.35 m en el centro. Transversalmente se dispone cada 0.40 m de vainas planas de pretensado con anclajes pasivo-ac-

tivo en cada extremo. Longitudinalmente sólo hay armadura pasiva.

La estructura metálica de calidades S 460 ML y M está formada por dos celosías tipo Warren paralelas unidas por vigas transversales en su nivel inferior cada 20 m. Las diagonales de la triangulación presentan un ángulo próximo a 45° . Cada 20 m. hay un triángulo lo que supone siete triangulaciones en el vano tipo de 140 m. El canto total de la estructura es de 10.2 m. la conexión con el hormigón se realiza mediante pernos Nelson de distintas longitudes ubicados en el cordón superior de la estructura.

Las pilas de hormigón armado son de sección exagonal, que se colocan sobre cajones previamente fondeados. La unión de ambos elementos se realiza por medio de una junta húmeda. La conexión de los cajones a la cama de escollera que le sirve de base se realiza por



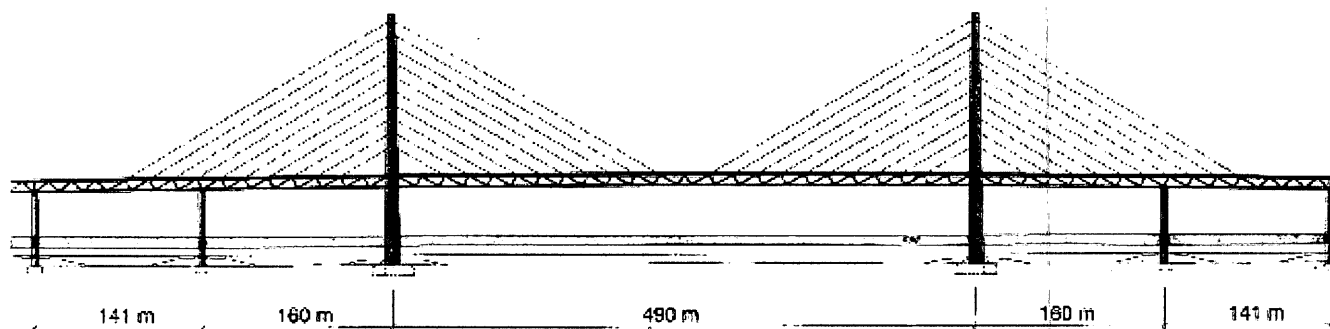


*Vista general del
Yard de Cádiz.*



*Montaje de uno
de los tramos.*

Alzado del tramo atirantado.



medio de inyecciones de mortero. Las dos pilas próximas a la navegación marítima se han dimensionado para una carga de colisión de 278 MN.

Todos los elementos son prefabricados, pilas, cajones y artesas para el confinamiento del balasto de la superestructura de la vía, realizándose en unas instalaciones específicamente construidas para este propósito en la costa sueca. La decisión de prefabricar ha sido la forma de garantizar los plazos de la obra, ya que algunos meses al año la climatología impide el desarrollo de los trabajos in situ, congelándose incluso las aguas del estrecho.

El tablero, en tramos de unas 5.500 tons. de peso, se fabrica en Cádiz en las instalaciones de Dragados Off Shore, según se describe más adelante. La colocación del tablero se realiza por medio de la grúa flotante "Svanen" de Ballast con una capacidad de carga de 9.000 tons, para lo cual se ha construido un balancín de 1.500 tons que iza el tablero en los 60 m. centrales y lo coloca en su posición definitiva sobre las pilas. La colocación de los cajones y de las pilas (hasta 4.000 tons.), también se realiza con esta misma grúa.

2.3.2. PUENTE ATIRANTADO

El vano libre central del puente atirantado, de 490 m presenta dos vanos de acompañamiento a cada lado de 141 + 160 m. Es 60 m de mayor luz que los vanos centrales de Iwagurojima y Hitsuishijima que tienen el mismo estado de cargas solicitantes (carretera + 2 vías de fcc con 200 km/hr de velocidad de diseño).

Los tirantes están dispuestos en dos planos paralelos separados transversalmente 30.5 m. El tablero tiene la misma morfología que la expuesta para los vanos de aproximación con excepción de las "costillas metálicas" cada 20 m igual que la modulación de las celosías y que sirve como elemento portante de los tirantes al tablero.

Los pilonos tienen una altura total de 203.5 m. Tienen dos patas independientes, de espesor variable de 0.36 a 0.670 m., unidas exclusivamente en el cajón único que le sirve de cimentación, y a nivel de empotramiento con el tablero donde se pretensa importantemente.

La estructura metálica (en secciones de 20 m. de longitud) se construye en los astilleros de Karlskrona próximos a las instalaciones de prefabricación de hormigón, se transporta por mar a éstas donde se hormigona el tablero y se coloca con la grúa flotante "Svanen".

3. VIABILIDAD ECONÓMICA

Los costes estimados en precios de 1990 y no teniendo en cuenta los costes financieros son para cada una de las partes los reflejados en el cuadro 1.

Todos los costes serán financiados por el Øresundskonsortiet estimando un plazo de 20 años para la recuperación de la inversión en la costa sueca, 26 años para el Øresund Link y 30 años para los trabajos en la costa danesa.

El Øresundskonsortiet adquiere el capital mediante la consecución de préstamos en el mercado internacional avalados por el gobierno danés y sueco. La recuperación de la inversión

se realizará mediante el cobro de peajes a los usuarios del Øresund Link entre los que estarán las compañías ferroviarias danesa (DSB) y la sueca (SJ). Ambas compañías ferroviarias pagarán conjuntamente 7.000 millones de pts por año (precios de 1991) por los derechos de

Cuadro 1

Trabajos en la costa sueca	1.9 Billones de SEK <>	38.000 millones de pts
Øresund Link	13.9 Billones de DKK <>	306.000 millones de pts
Trabajos en la costa danesa	5.0 Billones de DKK <>	110.000 millones de pts
Total		454.000 millones de pts

uso del paso, tasa que será abonada con independencia de la utilización del servicio. Éstas tasas no cubren los costes de construcción derivada de la implementación en el diseño del tráfico ferroviario.

Las tarifas a ser aplicadas a los usuarios del Øresund Link han sido calculadas en la hipótesis de 10.000 circulaciones diarias. La previsión anual de tráfico a partir del año 2.000, fecha de inauguración, es de 3.000.000 vehículos privados, 560.000 camiones y 60.000 autobuses.

4. CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DRAGADOS AL ØRESUND LINK

En marzo de 1996 Sundlink Contractors adjudica a Dragados Off Shore el suministro a sus instalaciones, en la ciudad sueca de Malmö, de los 49 tableros que constituyen la totalidad de los vanos de aproximación al puente atirantado. La finalización del suministro está prevista el verano del año 1999. Como mediciones más relevantes del suministro se tienen:

- ▼ Hormigón estructural.....67.000 m³
- ▼ Acero estructural.....67.000 ton
- ▼ Acero corrugado 13.000 ton
- ▼ Acero pretensado.....1.600 ton



Vista general de la zona de prefabricación.

La fabricación de los elementos se está realizando en el Yard que Dragados Off Shore dispone en Puerto Real (Cádiz). En Septiembre de 1997 se realizó el primer envío, con una pontona semisumergible de 24.000 tons. y 150 m de eslora, guiada con un remolcador de altura, de 15.000 HP, que transporta dos vanos de 5.500 ton. cada uno. Cada mes y hasta la finalización se prevé un embarque, cada uno con dos vanos, para lo cual se dispone de dos pontonas semejantes. La duración del transporte es de 14 días aproximadamente, y la altura máxima de ola de diseño durante el transporte es de 13.5 m. El trayecto se realiza a través del océano Atlántico, mar Cantábrico, golfo de Vizcaya, canal de la Mancha hasta las costas suecas, y descarga en Malmö. Para el aseguramiento de la carga durante el transporte y garantizar la ausencia de daños a la estructura mixta durante el mismo, se han diseñado y construido unas estructuras especiales de amarre y trincaje "sea fastening" con un peso total de 1.800 ton.

El Yard de Dragados Off Shore tiene en la actualidad una superficie total de 480.000 m² de los cuales casi 25.000 m² corresponden a talleres cubiertos para fabricación.

La complejidad en la estructura metálica es alta y los niveles requeridos de producción suponen la necesidad de fabricar mensualmente más de 3.000 ton.. La logística y los sistemas productivos han sido muy estudiados y optimizados al tenerse que manipular más de 120.000 planchas de chapa, de hasta 75 mm de espesor y de calidades S 460 ML y M que vienen



Transporte de dos tramos de los vanos de aproximación.

por barco desde Inglaterra (British Steel) y de Alemania (Daval), y tener que efectuar volúmenes de soldadura de 80 millones de cm^3 , todo ello bajo estándares muy altos de calidad que requieren una trazabilidad completa de los materiales y soldaduras. Al objeto de mejorar la competitividad y productividad se han instalado dos robots para la ejecución de la soldadura, que disponen de los seis grados de libertad.

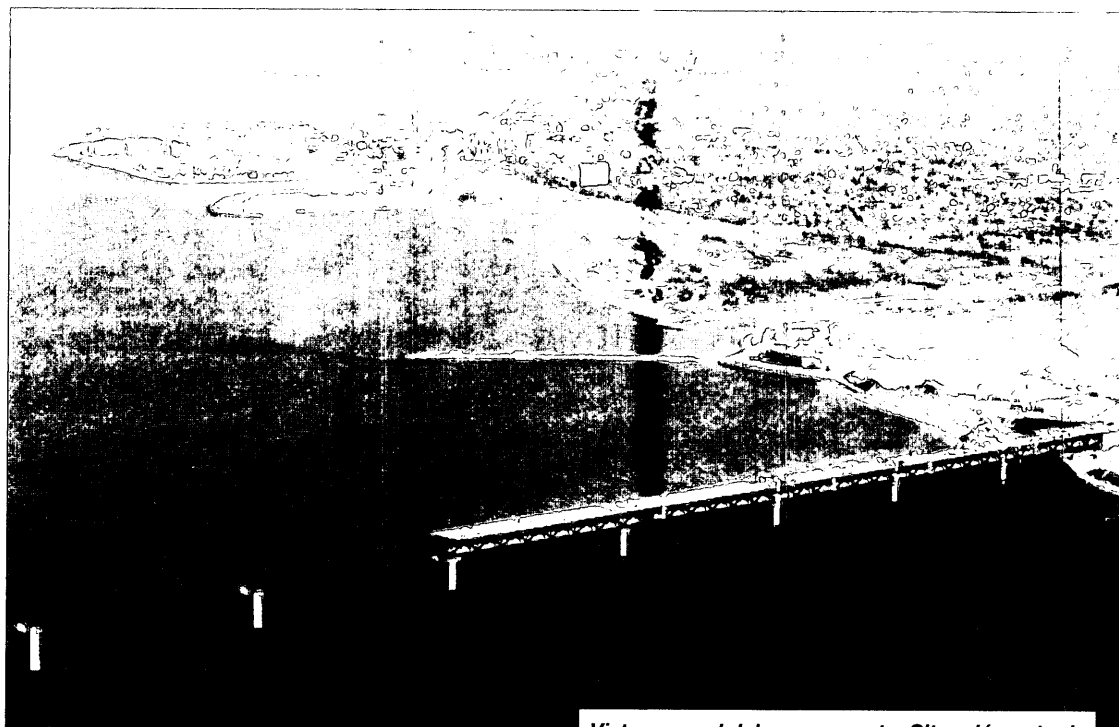
Las especificaciones de pintura son muy exigentes, asegurándose mediante garantía bancaria la idoneidad de los componentes y de la ejecución por un período superior a los 30 años.

Para el transporte de la estructura metálica dentro del Yard se utilizan 4 plataformas autopropulsadas de 17 a 21 ejes y 500 ton de capacidad de carga cada una. El peso de la estructura en ésta fase ronda las 1.500 ton. Una vez pintada se lleva a la zona de hormigonado en donde se apoya en dos imadas de hormigón armado separadas 100 m (el peso después de hormigonado es de 5.500 ton) que se prolongan con el mismo nivel hasta el final de la pontona, donde las imadas son metálicas. Los movimientos en estas posiciones se realizan por medio de 8 patines con cilindros hidráulicos de 1.000 ton. de capacidad que se desplazan a lo largo de las imadas con gatos "push-pull" sobre sandwich neopreno-teflón apoyado en vías metálicas.

Para la ejecución del tablero de hormigón dos aspectos son vitales para el cumplimiento de un Pliego que en muchos aspectos pretende ir más allá del "estado actual del arte" y que se justifica en la durabilidad de diseño:

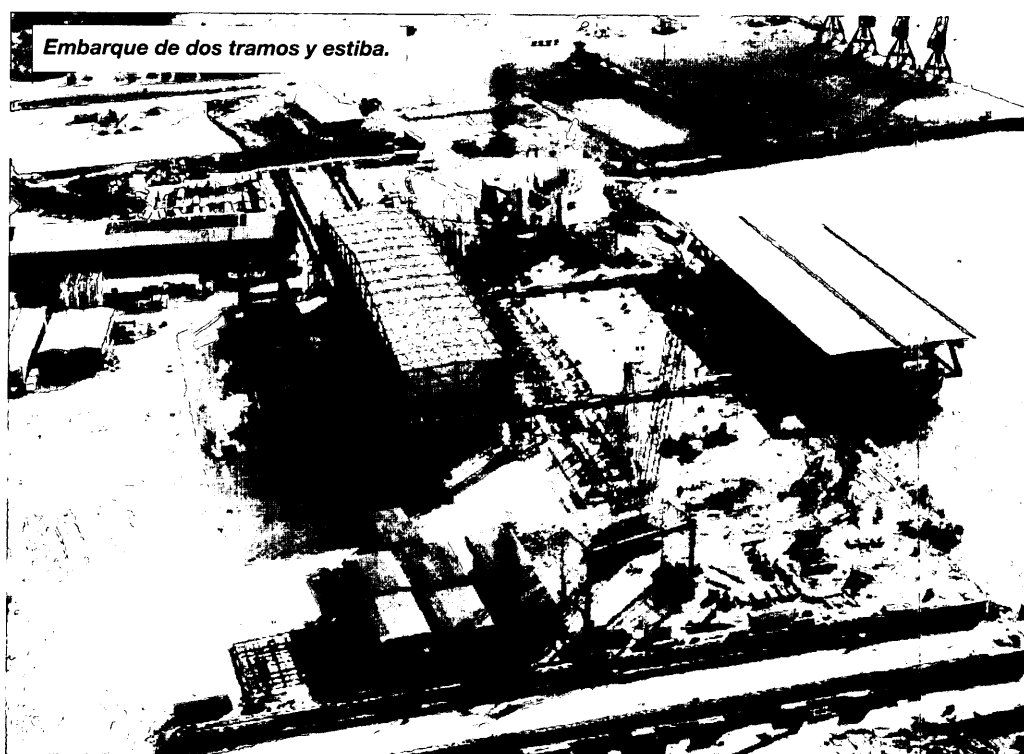
Por un lado las propiedades exigidas a los materiales constitutivos y a la mezcla tanto fresca como fraguada.

Por otro lado un estudio muy detallado de la puesta en obra que ha generado importantes inversiones.



Vista general del acceso norte. Situación actual.

Para la obtención de los materiales y de la mezcla se ha llevado a cabo la fase llamada "pretesting" con una duración superior a los 15 meses, en donde se han realizado una serie de ensayos de caracterización muy especiales.



Embarque de dos tramos y estiba.

Las necesidades de producción son de realizar dos vanos (2 x 140 m.) al mes, esto unido a los estrictos requerimientos del pliego ha generado el estudio e implantación de unas novedosas y avanzadas instalaciones de hormigonado, que ha modo de resumen se describen a continuación:

- ▼ Plantas de hormigón de 60 m³/hr, y amasadora con-tracorriente de 2 m³ de capacidad.
- ▼ Instalación de ensilado de áridos con capacidad para 3.000 ton.
- ▼ Refrigeración con nitrógeno de los componentes..
- ▼ Nave de hormigonado de 150 m de luz libre.
- ▼ Distribución del hormigón con cazos automáticos de 2 m³ de capacidad en monorraíl aéreo, de 670 m de recorri-do.
- ▼ Parque de prefabricación de ferralla y pretensado.
- ▼ Pórtico móvil sobre neumáticos de 29 m. de luz, 19 m de gálibo y 90 ton. de capacidad.
- ▼ Maquinaria de extendido y terminación del hormigón.
- ▼ Climatización de la nave durante el fraguado del hormi-gón con un aporte de hasta un millón y medio de frigorías.
- ▼ Control de temperaturas de los componentes, antes del amasado, y del hormigón durante el fraguado.

El cumplimiento de los requisitos del Proyecto ha generado la movilización de todos los departamentos especializados en estos temas del Grupo Dragados y en particular de Proyectos Especiales y Medio Ambiente (PEyMA), Asesoría Técnica de Construcción (Departamento de Estructuras) y GEOCISA.

5. FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA DEL HORMIGÓN EN EL PUENTE DE ØRESUND, SISTEMAS DE EJECUCIÓN

Los requerimientos tan exigentes del Pliego unido con las necesidades de producir 2 vanos de 140 m. al mes durante 25 meses de forma ininterrumpida aconsejó un estudio pormeno-rizado de la implantación de todos los procesos productivos, de la logística y de las características exigibles a todas y cada una de las instalaciones requeridas para la fabricación que en muchos casos eran absolutamente novedosas y técnicamente muy avanzadas.

Para el desarrollo y aprobación de los materiales, mezclas y sistemas constructivos, en la fase llamada "pretesting", se instalaron las plantas de hormigón en Julio de 1996. A la finali-zación del mismo, en Agosto de 1997, se realizó el primer hor-migonado y el primer embarque con los dos primeros vanos a finales de Septiembre. A partir de esta fecha cada mes se está realizando un embarque con dos vanos.

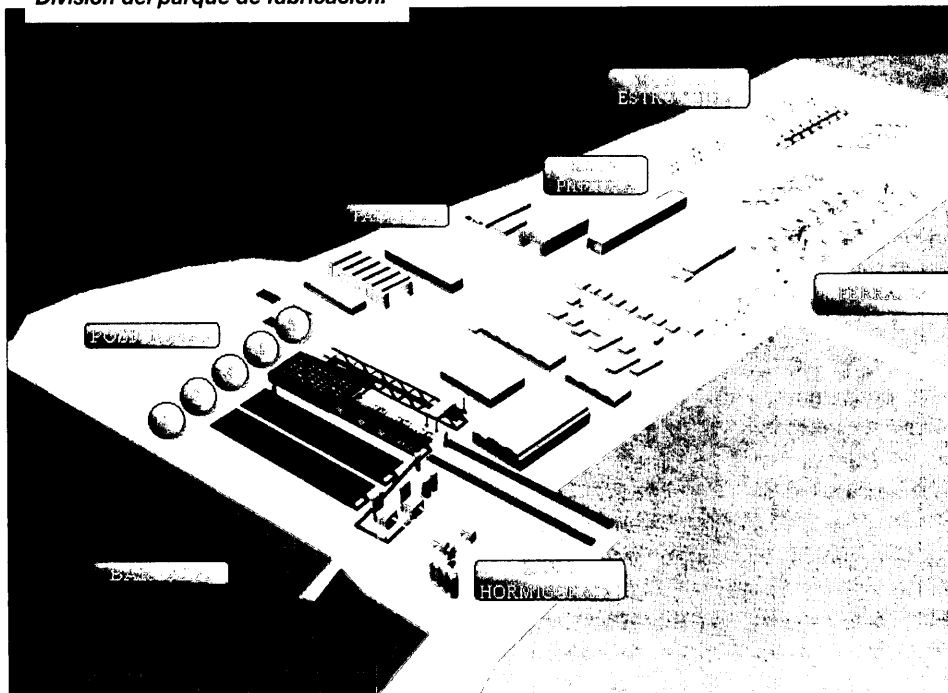
5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS

De los 480.000 m² del Yard empleados para la fabricación del puente 80.000 m² están directamente relacionados en acti-vidades del hormigón y 40.000 m² para el taller de prefabrica-ción de ferralla y postensado.

En la figura y diagrama anexo se muestran las distintas áreas específicas de fabricación:

Talleres de fabricación componentes metálicos.

División del parque de fabricación.

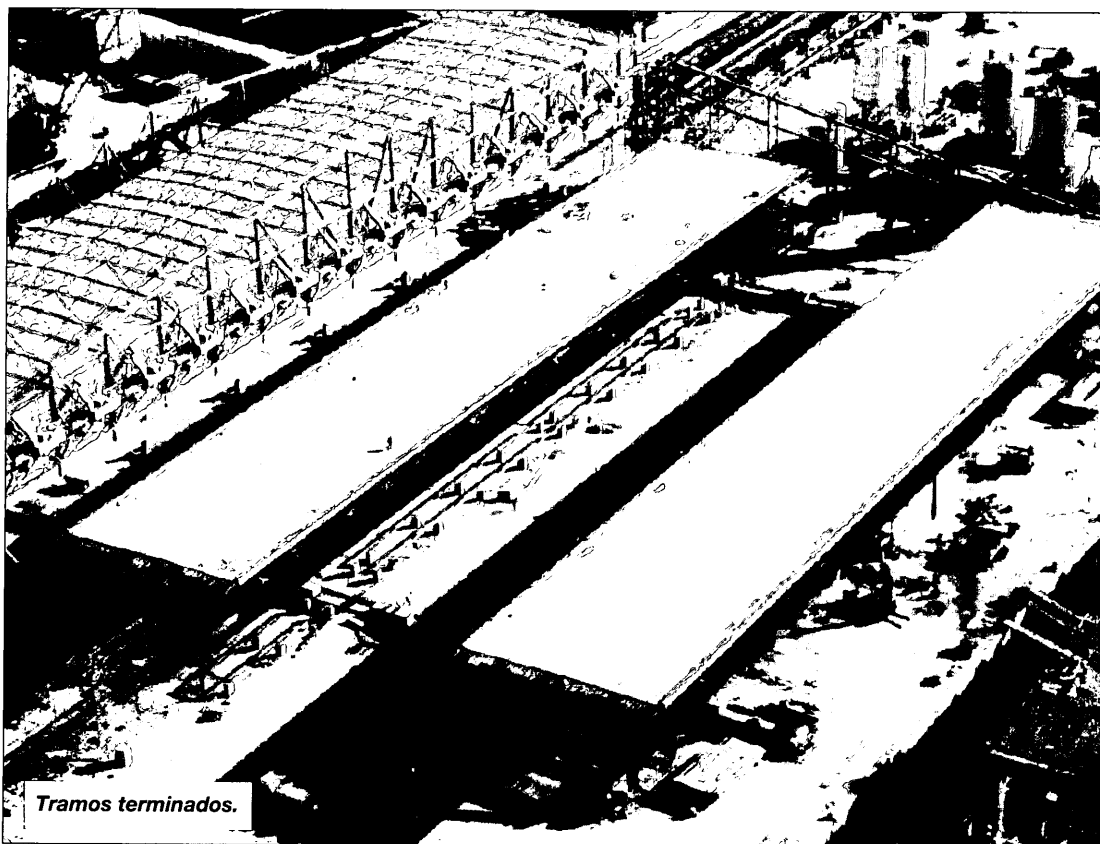


- ▼ Montaje y ensamblaje de la estruc-tura metálica.
- ▼ Prefabricación de ferralla y posten-sado.
- ▼ Nave de pintura del puente.
- ▼ Fabricación y puesta en obra del hormigón.
- ▼ Embarque.

En el diagrama se presentan las dis-tintas áreas o posiciones, a modo de ca-dena seriada, en donde se realizan las actividades principales que siguen:

Posición 5. Encofrado interior y co-locación de ferralla. La estructura metá-lica se deposita sobre unas imadas conti-nuas de hormigón de 3.50 m de ancho separadas a 100 m de longitud, perpendi-culares al cantil del muelle, y que se pro-longan hasta dentro de la pontona.

Se posicionan y nivelan los encofra-dos interiores, 7 módulos de 20 m, que



apoyan sobre las vigas transversales inferiores de la estructura. Se posicionan las jaulas prefabricadas de ferralla, 7 módulos de 20 m de longitud y de sección completa, por medio de un pórtico sobre neumáticos de 29 m de luz. Las jaulas de ferralla vuelan en esta fase de la estructura 4.25 m. La duración de los trabajos en esta posición es de 5 días.

El movimiento de los vanos desde esta posición hasta embarque incluido se realiza deslizando a lo largo de las imadas por medio de 8 gatos hidráulicos de 1.000 ton de capacidad y gatos de empuje push-pull.

Posición 4. Hormigonado y postensado. Dentro de la nave. La estructura se coloca sobre las imadas y sobre apoyos pilotados en cada nudo de sendas celosías. Los apoyos en alzado reproducen la contraflecha requerida en esta fase de construcción (alrededor de los 250 mm).

Se posiciona el encofrado exterior por medio de rodadura sobre carriles con tiro por medio de cabrestantes. Se nivelan todos los elementos ajustándose a la curvatura en planta y en alzado requeridos, encofrado exterior, bordillo y carriles de la máquina de fratasado final.

Se procede el hormigonado, operación continua de 35 a 40 hr.

A las 24 hr. de la finalización del hormigonado, habiéndose alcanzado los 20 MPa de resistencia que exige el pliego, se realiza el postensado transversal, operación de un día de dura-

ción, con 4 equipos de trabajo. El tensado se realiza con gato individual (alevín).

Se retira el encofrado exterior y se mueve a la siguiente posición.

La estancia del puente en esta posición es de 10 - 11 días.

Posición 3. Desencofrado interior. Se retira el encofrado interior por medio de barras de tiro "Dywidag", tras haber sido bajados los paneles encofrantes con los hidráulicos incorporados en el propio carro.

Se realizan los últimos trabajos: inyección de tendones de pretensado, relleno de cajetines, etc.

La estancia del puente en esta posición es de 9 - 10 días.

Posición 2 y 1. Zonas de acopio previas al embarque.

Se realizan los últimos retoques a los puentes, así como los tabladros en la parte inferior del tablero, para la sustentación de la Catenaria.

5.2. HORMIGONADO DE UN TRAMO

El proceso de hormigonado es una operación continua de duración entre 35 a 40 horas con un rendimiento medio de 35 a 40 m³/hr. Al objeto de minimizar la posibilidad de una "junta fría" y basado en un análisis de riesgos se han desarrollado e implantado planes de contingencia que dan respuesta a cualquier situación que pudiera presentarse durante el mismo. Como consecuencia de ellos, cada instalación tiene su sistema alternativo de contingencia o back-up, por si el tiempo de respuesta para resolver la disfunción excede al admisible. Por ejemplo, hay una segunda planta de hormigón sólo por si falla la primera, grupos electrógenos de emergencia, un sistema alternativo al transporte automático de hormigón, repuestos de todos los componentes, etc. Se ha definido una junta fría cuando el flujo de hormigón en una sección se interrumpe por un período superior a una hora.

Los silos de áridos, cemento, microsílce y aditivos, dimensionados para una capacidad mínima de un vano (alrededor de los 1.500 m³ de hormigón), son chequeados previamente al hormigonado tanto la cantidad como la temperatura del mate-



Sistema de distribución del hormigón de la losa.

rial que aloja, al igual que todos los elementos o instalaciones principales y de contingencia que intervienen en el hormigonado

Seleccionada la planta que iniciará el hormigonado se recargan sus silos secundarios aplicando el tratamiento criogénico requerido, función de las condiciones ambientales y de las temperaturas de tratamientos anteriores. Realizada la amasada de 2 m³ se descarga la misma en una vagoneta, y en simultaneo, en un toma-muestras.

El hormigón descargado en el toma-muestras es ensayado en el laboratorio secundario próximo a las plantas. Aire

ocluido, cono, temperatura y densidad son ensayados y registrados. Si en algún parámetro los límites prescritos son excedidos la amasada es rechazada directamente desde el laboratorio por un PC que transmite la señal a la vagoneta. Los ensayos reseñados se realizan al 100 % en todas las amasadas. Si los resultados de una serie de 8 amasadas son todos positivos se va reduciendo el volumen de ensayos hasta un mínimo del 30 % de las amasadas.

La vagoneta recorre el camino desde la planta hasta su punto de vertido dentro de la nave, en un puente de distribución, que reparte el hormigón en tongadas. Simultáneamente el hormigón está siendo ensayado. Si el resultado no es aceptable la vagoneta no descarga en el puente y lo vierte en una zona especial de rechazos.

El reparto del hormigón se realiza en fases:

- ▼ Bordillos extremos y conexión con la estructura metálica en tongadas de 0.40 m.(1ª tongada).
- ▼ Bordillos extremos y sección transversal completa en calles de 0.70 m de ancho. (2ª tongada).
- ▼ Última tongada (tercera) en bordillos.

En cada una de las fases se realiza una vibración manual.

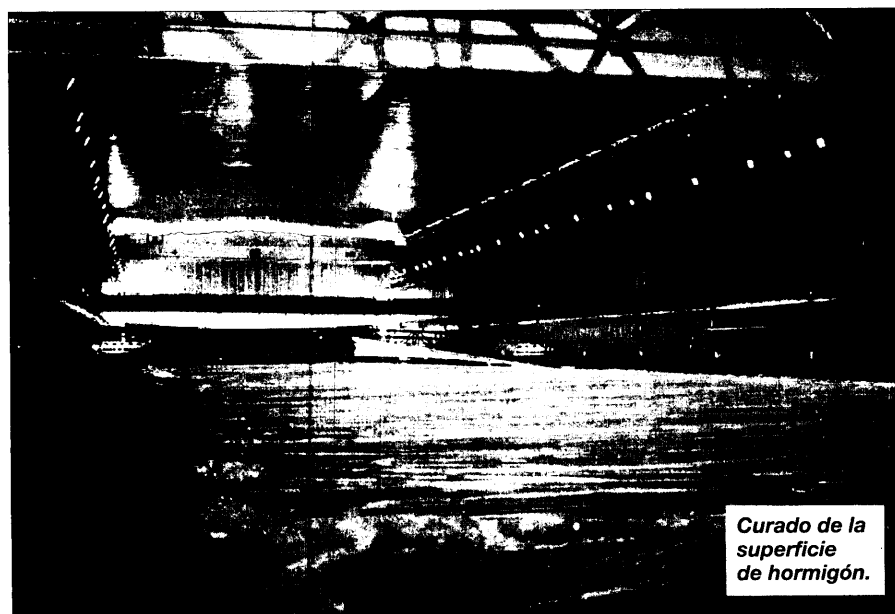
La terminación de la superficie se realiza con una máquina que nivela y confiere el grado de rugosidad requerido. Por detrás de ésta máquina hay un puente de fratasado manual que tiene como misión corregir cualquier desperfecto que pudiera dejar la máquina automática, colocación de termosensores de superficie y colocación de los plásticos de curado, que deben ser colocados antes de llegar al grado de evaporación límite (0,5 kg/m²). Paralelamente al proceso de hormigonado se desencofra, después de 12 hr, los encofrados de los bordillos.

Cada 12 hr se cambia de planta de hormigonado, y se realiza la limpieza de todos los elementos.

5.3. INSTALACIONES

Enfriamiento y ensilado de componentes. Plantas de hormigón.

Las temperaturas de los componentes en todas y cada una de las fases se monitorizan y se registran informáticamente. Se estima la temperatura previsible de la masa de hormigón,

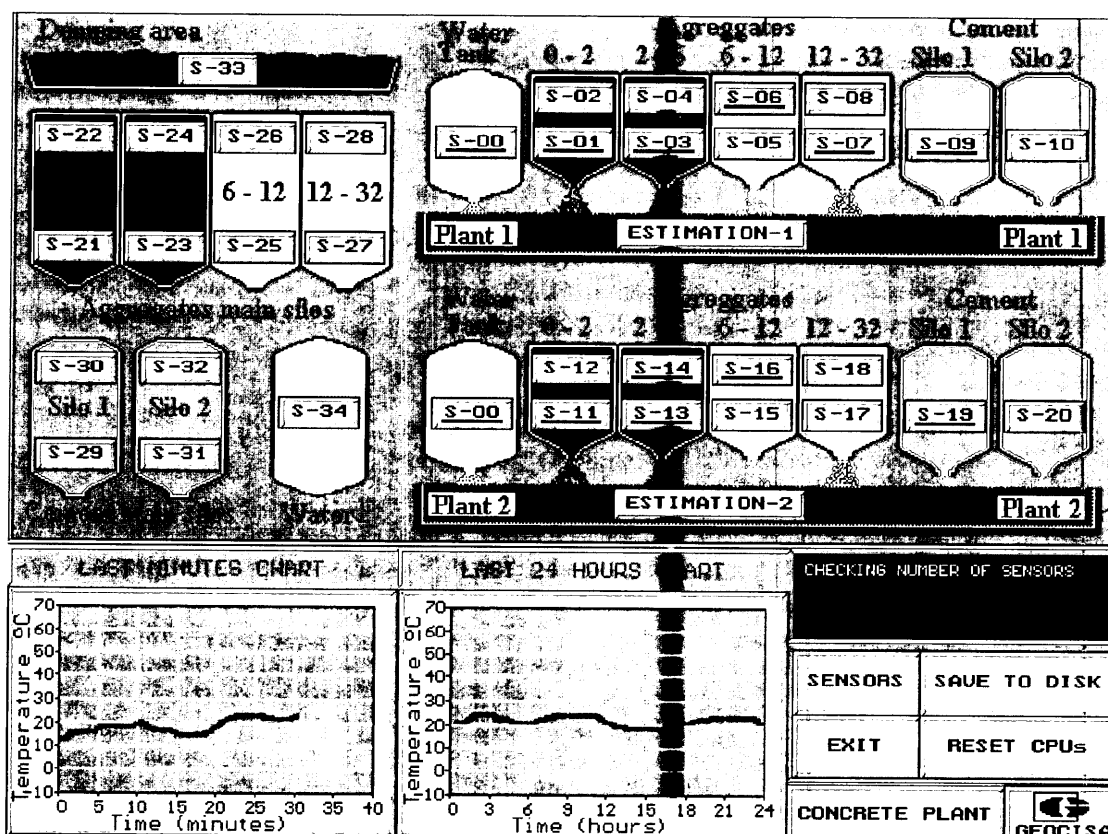
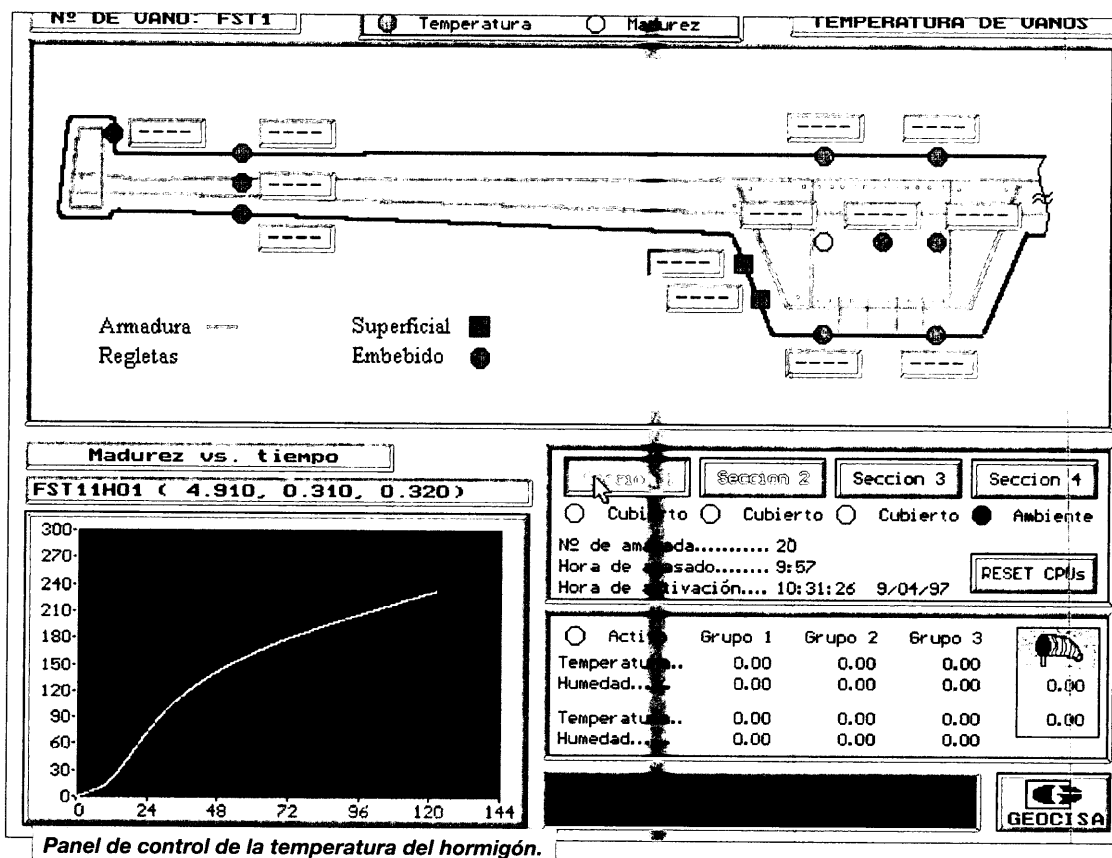


Curado de la superficie de hormigón.

que no debe exceder de los 20° C, incorporando el aporte calórico de la amasadora y otros. Función de esta estimación se toman decisiones, básicamente regular el proceso de enfriamiento de los componentes o el de climatización de la nave. En la primera figura se pueden observar la pantalla del ordenador donde se visualizan las temperaturas de los componentes con la estimada del hormigón, y en la segunda figura, las medidas de temperatura durante el proceso de fraguado en todos los termosensores, que no deben exceder de los 60° C.

Los áridos graníticos provienen de la provincia de Madrid, de las canteras de la Pola para los tamaños 2-6, 6-12 y 12-25 mm, y de la cantera de Jaramasa para la arena 0-2 mm. Los lotes, una vez aprobados son lavados y se depositan en contenedores que se precintan. Son transportados por ferrocarril hasta la estación del Puerto de Santa María, y mediante plataforma al Yard de fabricación de Dragados Offshore.

El cemento, de bajo contenido en álcalis, sin cromatos y con sello especial de fabricación "tipo Øresund" proviene de la factoría de Valenciana de Cementos en San Vicente de Raspeig (Alicante), transportándose en barco



Monitorización de temperaturas de los materiales constituyentes del hormigón.

a unos silos situados en el Puerto de Cádiz. A la llegada al Yard se descarga en dos silos de 250 ton de capacidad cada uno. En el trasvase del cemento desde éstos silos principales a los de las plantas se le aplica un tratamiento criogénico informatizado que reduce la temperatura del mismo hasta la ambiental.

El agua empleada en la fabricación del hormigón se enfría por medio de una planta enfriadora hasta los 4°C.

Las dos plantas de hormigón son SKAKO de 60 m³/hr de capacidad, con amasadora de eje vertical contracorriente de 2 m³. Una de ellas ha sido dispuesta de "reserva" acorde a los Planes de Contingencia, para minimizar los riesgos de "junta fría". Dispone de 4 tolvas de 30 m³ de capacidad, 2 silos de cemento de 85 ton y uno de slurry de 40 ton. El modelo elegido garantiza una tolerancia de pesada muy estricta y una excelente homogeneidad de la amasada. Hay 3 cámaras de video estratégicamente colocadas, una de ellas en el interior de la amasadora. El slurry empleado, 50 % microsílce y 50 % agua, proviene de Rotterdam (Holanda) con materia prima de Noruega. Durante su almacenamiento en las plantas de hormigón se mantiene en permanente agitación, al objeto de garantizar la homogeneidad prescrita.

Climatización y nave de hormigonado.

Para el fraguado del hormigón se han diseñado unas instalaciones que mantienen dentro de la nave una temperatura de 20°C para el día más caluroso. Básicamente constan de los elementos que siguen:

- ▼ 3 enfriadoras de agua condensadas por aire de 651 KW de potencia frigorífica y un caudal de agua de 31 litros/s. La temperatura de salida es del agua es de 6°C.
- ▼ 28 climatizadores con un caudal de aire de 11000 m³/hr y 10 toberas de soplado por cada uno de ellos. Redes de tuberías y conductos de agua y aire.
- ▼ Instrumentación y control informático de todos los procesos.

Dadas las condiciones ambientales requeridas para la puesta en obra del hormigón y la necesidad de realizar el ripado de los puentes en dirección transversal, se ha dimensionado una nave de 150 m de luz, 32 m de anchura y 26 m de altura total, 15 m de ellos libres. La estructura principal está compuesta por dos celosías paralelas tipo Pratt, pretensadas en el cordón inferior y convenientemente rigidizadas entre sí.

El cerramiento se ha realizado con paneles tipo "sandwich" y en el techo se ha dispuesto poliuretano proyectado como aislamiento térmico.

Sistema de transporte del hormigón

El transporte de hormigón desde las plantas hasta la nave se realiza mediante 3 vagonetes o skips, de 2 m³ de capacidad cada uno, que circulan en un monorraíl en circuito cerrado de 670



m. de longitud, que parte de la cota +3 en las plantas, hasta la cota +27 m. dentro de la nave.

Todo el sistema de transporte está informatizado. Se controla mediante sensores de posición a lo largo de todo el circuito, y la comunicación entre los PLC's de cada uno de los skips y el PLC central, de manera que el sistema conoce la posición y el status de cada skip.

Desde el laboratorio se transmite la orden de conformidad de la amasada, que recibida por el PLC del skip activará su motor de paro y volteo del hormigón, cuando el sensor de proximidad detecte al pórtico transversal de distribución. El vertido a lo largo del tablero se realiza con este pórtico que tiene una tolva de 2 m³, una capacidad de giro de 360° y un mecanismo de ajuste en vertical de hasta 1.500 mm, que tiene la función de reducir la altura de vertido, al poderse adaptar a las distintas cotas a lo largo de la sección transversal y a la contraflecha longitudinalmente.

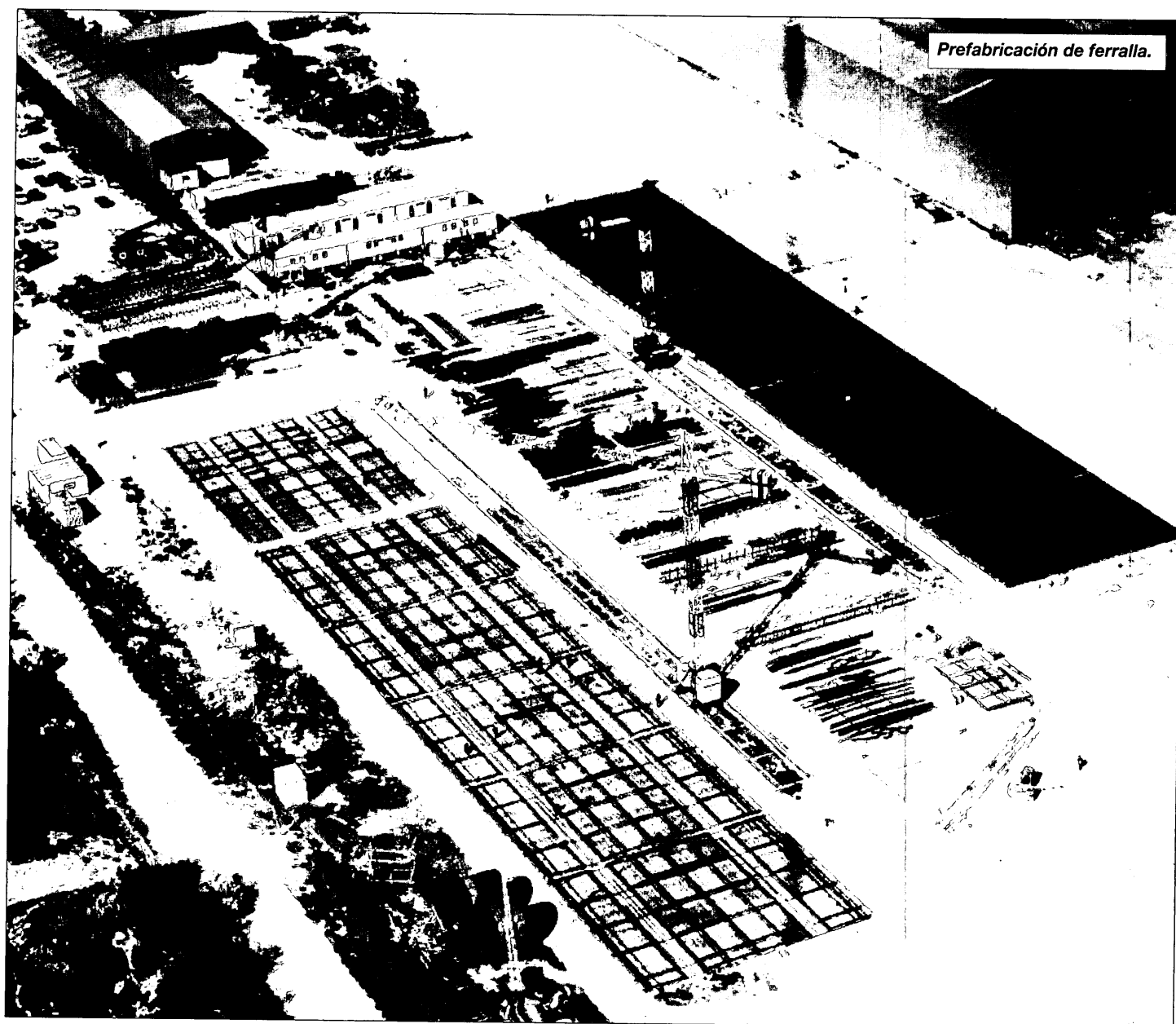
Máquina de nivelación y acabado superficial

Las estrictas tolerancias de construcción, y en particular las referidas al espesor, anchura y curvatura del tablero de +/- 5mm, unido a los requerimientos de textura y planeidad aconsejó la instalación de una máquina para la nivelación y acabado superficial del tablero o fratasadora.

Esta máquina rueda sobre unos carriles separados 29 m. que reproducen la contraflecha y curvatura del tablero, y que se ubican sobre cada uno de los encofrados exteriores. La máquina dispone de un carro que se traslada transversalmente sobre la celosía portante. Este carro dispone de dos rodillos sin fin que distribuye el hormigón, una bandeja vibrante y dos cilindros alisadores. Cuenta con dos motores de 17.2 Kw y el avance longitudinal entre pasadas es de hasta 25 cm.

Encofrados

Dada la forma de la sección transversal y el sistema de ejecución elegido se hace obvia la distinción entre los encofrados exteriores, que encofran el voladizo de la sección, de aproxima-



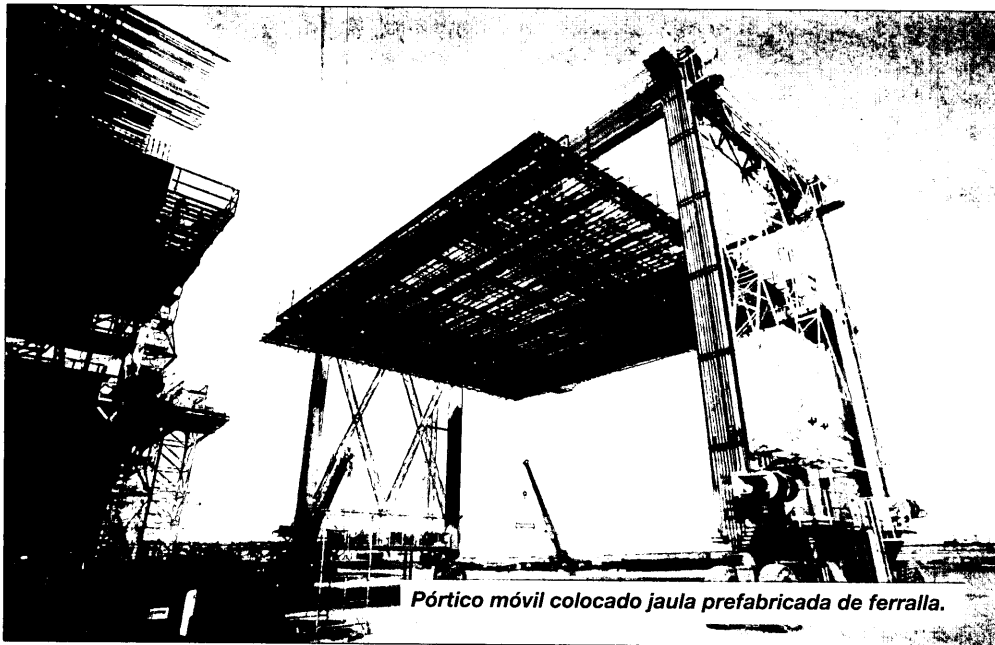
Prefabricación de ferralla.

damente 4.25 m; y los interiores. En la parte central de la sección, con 15 m. entre bordes de celosías. Ambos tipos se han modulado en carros individuales de 20 m. de longitud y de construcción metálica, tanto la estructura principal y accesoria como los paneles encofrantes. El peso total del conjunto ronda las 1.400 ton.

Todos los carros de los encofrados exteriores llevan incorporados los encofrados de los bordillos laterales que se ajustan por medio de 12 cilindros hidráulicos y de las carrileras con regulación independiente para la máquina de terminación. La rodadura se realiza por medio de ruedas metálicas a lo largo de carrileras. La operación total de encofrado de la sección se realiza en dos jornadas de trabajo y el desencofrado en una.

Parque de prefabricación de ferralla y Pórtico móvil sobre neumáticos

Las tolerancias de colocación de las barras de ± 10 mm unido a la necesidad de realizar el montaje de la ferralla en el tablero en 2 días, aconsejó el premontaje de la misma en jaulas de 20 m de longitud y de anchura la sección completa, que incorporan todo el postensado transversal de la sección, anclajes incluidos. Los pesos de la jaula llegan hasta las 70 ton. El montaje de la armadura se realiza en bancadas metálicas que reproducen la forma de la sección y disponen de topes para el posicionado de las barras. Se han instalado dos juegos de bancadas de ferralla, 14 módulos de 20 m de lon-



Pórtico móvil colocado jaula prefabricada de ferralla.

gitud. La manipulación de la ferralla se realiza por medio de 3 grúas torre, dos de ellas para las bancadas y la tercera para la descarga de camiones y transporte del material del taller de elaboración y corte a las bancadas.

El transporte de las jaulas completamente terminadas al tablero (500 m) se realiza por medio de un pórtico móvil sobre neumáticos de 29 m. de luz, que iza directamente éstas de las bancadas de prefabricación. Dispone de 4 ganchos de 25 ton. de capacidad cada uno y una altura bajo gancho de 17 m. El motor es diesel de 200 CV y el radio mínimo de giro 18 m. Los cuatro trenes de ruedas están sincronizados, dos de ellos son tractores. Las operaciones se dirigen mediante un sistema electrohidráulico gobernado por un autómata programable.

Control de temperaturas y fisuración del hormigón en edades tempranas.

Al hormigón se le exigen altas prestaciones y entre ellas una elevada durabilidad. Para garantizar, es preciso asegurar previamente y controlar durante la construcción de los tableros, que las temperaturas máximas y las tensiones de tracción no superan los valores admisibles. Antes de la construcción se ha calculado el tablero con un programa de elementos finitos que considera el calor generado, la retracción y la fluencia del hormigón y las condiciones ambientales de ejecución.

En la durabilidad de un hormigón al que se le requieren altas prestaciones, influyen de una forma muy importante tanto la temperatura que se produce en el proceso de fraguado y endurecimiento, como la fisuración que esta temperatura y la retracción a edades tempranas pueden producir.

Para controlar este riesgo y conocer las medidas que es necesario adoptar para que el riesgo no sea superior al admisible, se ha realizado una simulación de la estructura con el Método de los Elementos Finitos, teniendo en cuenta todas las fases y características de la obra a realizar, y considerando el calor generado, la retracción y la fluencia del hormigón y las condiciones ambientales de ejecución. Con este cálculo se obtiene una predicción de suficiente aproximación del comportamiento real de la estructura.

Para poder comprobar que la ejecución de los tableros es correcta y que se cumplen las condiciones de la especificación, se instalan en cada uno de los 49 tableros a construir cuatro secciones de sensores

de temperatura. En cada sección se instalan 13 termosensores, distribuidos entre el interior (temperatura máxima) y el contorno (t. mínima).

El número de sensores de ambiente es de seis, tres bajo el encofrado y tres en la nave. Se han añadido dos sensores de velocidad de viento de hilo caliente debajo del encofrado, para modelizar mejor el coeficiente de transmisión superficial del encofrado. El programa de lectura se ha adaptado a la distribución de sensores y se le ha añadido un cálculo de la madurez en función de la temperatura de cada sensor, ya que las operaciones de desencofrado y pretensado se realizan cuando se ha alcanzado una determinada madurez.

6. MATERIALES Y PROPIEDADES DEL HORMIGÓN PARA EL PUENTE DE ØRESUND. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

El Pliego de Condiciones de la obra de referencia impone fuertes condicionantes a los materiales a emplear para la confección del hormigón, así como para su fabricación, a fin de conseguir un diseño de hormigón de altas prestaciones en relación a una vida útil de 100 años en un clima especialmente duro como el existente en el norte europeo.

Seleccionados los materiales constituyentes del hormigón, se inició un proceso de ensayos, de más de un año de duración para distintos diseños de mezcla, tanto del hormigón fresco como del hormigón endurecido, así como de las características del propio proceso de endurecimiento.

Como características genéricas, se requiere un hormigón que no presente posibilidad de reacción álido-álcalis, que resista los ciclos de hielo deshielo, que posea una resistencia

mínima a compresión de 50 MPa y que impida la penetración de cloruros. Los requisitos establecidos afectan tanto a los materiales constituyentes como a los procesos de producción y las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

6.1. PROPIEDADES EXIGIDAS A LOS MATERIALES CONSTITUYENTES

- ▼ **Cemento:** Se permite exclusivamente cemento tipo Portland CEM I 42.5 o CEM I 52.5 de acuerdo con la EMV 197-1 con algunas características adicionales.
- ▼ **Microsilice:** Debe cumplir los requisitos previstos en la ENV-197-1, aún siendo su proporción inferior al 5% del peso de cemento, con algunos como requisitos adicionales.
- ▼ **Cenizas volantes:** No se permite su uso.
- ▼ **Agua:** Debe ser suministrada por una red de agua potable cumpliendo los requisitos establecidos por el Ministerio Danés de Medio ambiente, limitándose el contenido máximo de cloruros en 600 mg/l de acuerdo con la DS 249.
- ▼ **Aditivos:** Deberán cumplir los requisitos establecidos en las normas prEN 934-2 y prEN 934-6.
- ▼ **Arido grueso:** Se define como tal, aquel en el que la mayor parte de las partículas tienen diámetros superiores a 2 mm. Debe proceder del machaqueo de rocas sanas sin sustancias degradables.
- ▼ **Arido fino:** Se entiende por tal aquel que su tamaño máximo es inferior a 2 mm.

6.2. LIMITACIONES AL DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de la mezcla de hormigón debe cumplir con las siguientes requisitos:

- ▼ Máxima relación agua-cemento 0,4
- ▼ Mínimo contenido de cemento 325 Kg/m³
- ▼ Máximo contenido de microsilice 5% del peso total de cemento microsilice
- ▼ Mínimo contenido de cemento+microsilice 340 Kg/m³
- ▼ Máximo contenido de ion cloro menor del 0,1% del contenido de cemento microsilice
- ▼ Máximo contenido de Na₂O equivalente menor de 3 Kg/m³ para un contenido de mortero del 60% todos ellos referidos a las cantidades realmente dosificadas.

6.3. PROPIEDADES EXIGIDAS AL HORMIGÓN FRESCO

Las propiedades que debía satisfacer la mezcla son las siguientes:

- ▼ Contenido en aire ocluido tal que, estando comprendido entre el 9,5% en hormigón fresco y el 3% en hormigón en-

durecido, permitiera lograr una resistencia adecuada al hielo y los ciclos de hielo deshielo, medida ésta mediante los ensayos de "salt scaling" y "critical dilation" sobre probetas de hormigón endurecido.

- ▼ Control del aire ocluido medido con el aerómetro mediante la determinación de la densidad del hormigón fresco.
- ▼ Trabajabilidad suficiente para una adecuada puesta en obra del hormigón habida cuenta de los sistemas de puesta en obra previstos y teniendo en cuenta la temperatura ambiente y del hormigón.
- ▼ Inicio de fraguado inferior a 6 horas, salvo justificación especial y demostración mediante petrografías de la calidad de la estructura interna del hormigón.
- ▼ Ausencia de exudación.

El Pliego de Condiciones exige el estudio de la estabilidad del sistema de aire ocluido, para cada una de las mezclas, variando los tiempos de amasado, los tiempos de transporte, el bombeo/no bombeo del hormigón y distintos métodos de vibrado y tiempos del mismo. Requiere, así mismo el establecimiento de una relación entre el contenido de aire ocluido medido inmediatamente después del amasado, del transporte y de la puesta en obra del hormigón fresco y una vez endurecido, mediante el hormigonado de bloques de al menos 1 m³, para que el contratista establezca los límites de validez de la mezcla ensayada. El mismo estudio debe hacerse para la trabajabilidad y la temperatura.

6.4. PROPIEDADES EXIGIDAS AL PROCESO DE ENDURECIMIENTO

Al fraguado y endurecimiento del hormigón se le exige, teniendo en cuenta el proceso de puesta en obra del mismo, que las temperaturas máximas y las tensiones de tracción generadas por las mismas no superen unos determinados límites admisibles.

El Pliego exige una interpolación exponencial para la determinación de la evolución de las siguientes propiedades:

- ▼ Desarrollo de la resistencia a compresión
- ▼ Desarrollo de la resistencia a tracción
- ▼ Desarrollo del módulo de elasticidad
- ▼ Desarrollo del calor de hidratación
- ▼ Valor del coeficiente de expansión térmica a distintas edades
- ▼ Desarrollo de la retracción hasta los 28 días de edad
- ▼ Desarrollo de los valores de fluencia hasta los 28 días de edad
- ▼ Valores del calor específico del hormigón fresco, en proceso de endurecimiento y endurecido
- ▼ Coeficiente de Poisson
- ▼ Desarrollo de la conductividad térmica

6.5. PROPIEDADES EXIGIDAS AL HORMIGÓN ENDURECIDO

Las propiedades exigidas al hormigón endurecido son dos, una resistencia a compresión superior a 50 MPa medido en probeta cilíndrica de 15 por 30 cm, y un contenido y distribución de aire ocluido tal que, siempre por encima del 3%, permita obtener unos valores de pérdida de masa menores a 0,3 Kg/m², en valor medio de 4 probetas y 0,5 como valor individual, después de 56 ciclos de hielo deshielo, y 1 Kg/m² después de 112 ciclos según la norma de ensayo SS 136244; y la ausencia de dilatación crítica en probetas ensayadas a 3, 8, 12, 16, 20 y 24 semanas de edad de acuerdo con la norma ASTM C 671 modificada.

Los ensayos de pérdida de masa, "salt scaling", deben superarse tanto por las probetas tomadas en laboratorio como por los testigos extraídos de los bloques de 1 m³ elaborados durante el estudio de las propiedades del hormigón fresco.

Amén de las condiciones anteriores, el Pliego exige la determinación de la permeabilidad a los cloruros del hormigón endurecido mediante las normas de ensayo ASTM C 1202 y APM 302 sobre testigos extraídos desde los seis meses de madurez en adelante; la determinación de la densidad del hormigón endurecido y el estudio petrográfico del hormigón, este último tanto para determinar la calidad del aire ocluido como la de la estructura interna del hormigón, con el fin de establecer las correlaciones necesarias para asegurar un control del mismo durante la fase de producción sin necesidad de la realización continua de ensayos de larga duración.

6.6. DESARROLLO DEL PRE-TESTING

La complejidad de los requisitos exigidos tanto a los materiales constituyentes del hormigón, como al hormigón en sí mismo, unido, por un lado, a las altas exigencias de calidad a nivel formal: exigencia de autocontrol de todos los materiales, aplicación de la ISO 9000 a todos los suministros, obligación de realizar los ensayos en laboratorios acreditados en dichos ensayos y trabajando de acuerdo con la EN 45001, y la aplicación de normativa extranjera en todos los ensayos, alguna de ellas de carácter provisional, ENV, prEN; y, por otro, a la larga duración de alguno de los ensayos, en los que no se tenía la experiencia necesaria para asegurar su resultado positivo; obligó, ya desde la fase de la oferta, a iniciar los primeros estudios de idoneidad de materiales constituyentes y a la evaluación de distintas centrales de hormigonado capaces de satisfacer las demandas de calidad exigidas.

Teniendo en cuenta las fechas de adjudicación de obra, la duración de los ensayos y la fecha en que debía comenzarse la producción para cumplir con los plazos impuestos por el cliente, no quedaba holgura alguna para desarrollar el pretesting de una única mezcla y corregirla si en algún ensayo no se alcanzaban los límites establecidos. Se optó entonces por

estudiar en paralelo varias soluciones, tanto para los áridos como para el cemento y el diseño de mezcla en sí mismo, llegando al diseño de mezcla que se describe a continuación.

- DISEÑO DE LA MEZCLA

MATERIAL.....	Kg/m ³
Cemento	380
Microsílice (slurry).....	29
Agua	139
Plastificante	0.76
Fluidificante	7.9
Aireaste	0.45
Arena 0-2	624
Arido 2-6.....	137
Arido 6-12.....	438

-RESULTADO DE LOS ENSAYOS

La curva granulométrica de la mezcla definida anteriormente se sitúa en la zona óptima según la DIN 1045. La relación agua cemento equivalente es de 0,34, mientras que la relación agua conglomerante es de 0,353.

El contenido de álcalis es de 2,6 Kg/m³, mientras que el contenido en cloruros se sitúa en el 0,06% sobre el peso de conglomerante.

El contenido de aire se sitúa en el 6% con un tiempo final de amasado de 60 segundos y total de 115 segundos. El porcentaje de aire de dimensión inferior a 2 mm es del 3.6% con una superficie específica de 29.5 mm⁻¹ y un factor de espaciamiento de 0,14 mm.

La estabilidad del sistema de aire ocluido no se ve afectada por la variación del tiempo de amasado, habiéndose ensayado con 45, 60 y 90 segundos, conservándose estable durante el fraguado. Si es, sin embargo, muy sensible al tipo y duración del vibrado.

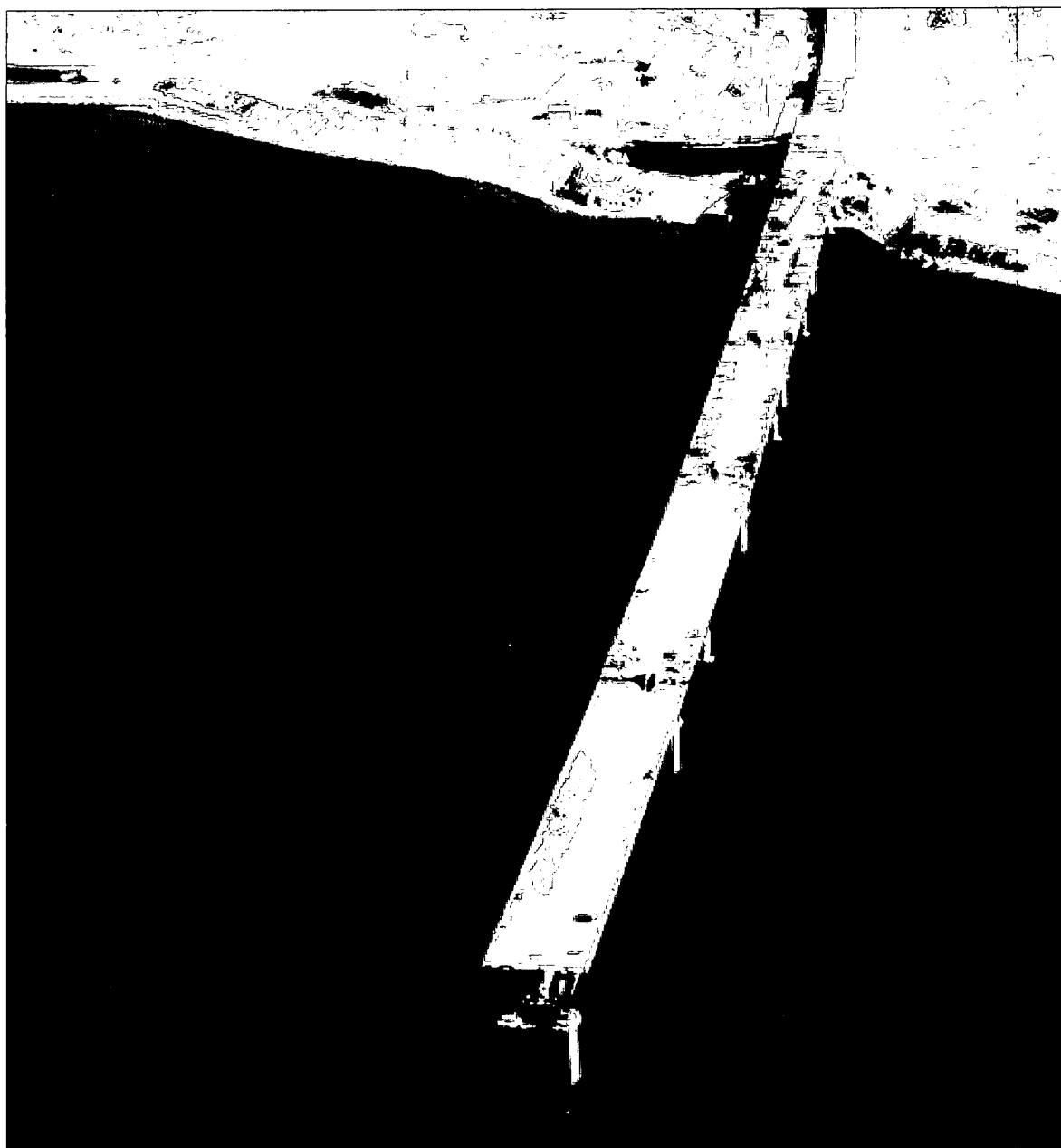
La densidad del hormigón fresco es de 2,34 Kg/m³ y su consistencia a la salida de amasadora de 15 cm medido en cono de Abrams, con una dispersión perfecta tanto de la microsílice como del cemento.

El inicio de fraguado se produce a los 412 minutos y su final a los 422.

La resistencia a compresión se sitúa alrededor de los 60 MPa, el módulo de elasticidad es de 34.5 GPA y la resistencia a tracción de 4,9 Mpa.

En cuanto a la resistencia al hielo, el valor de la pérdida de masa se sitúa en 100 g a los 56 días tanto en probeta como en testigo, y en 330 g a los 112 días. El valor de la dilatación crítica no supera las 40 micro deformaciones, lo que representa menos del 50% de la deformación de rotura del hormigón a tracción.

El montaje final.



Los valores de la permeabilidad a los cloruros se han situado entorno a 425 culombs y el coeficiente de difusibilidad a los cloruros en $2,31 \text{ E}^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

En cuanto a las propiedades del proceso de endurecimiento destacar que el calor generado en el mismo es de $305 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$.

Dansk Beton Teknic (DBT, Dinamarca) ha colaborado en los estudios petrográficos y análisis del aire ocluido en el hormigón. SP (Suecia) ha realizado los ensayos de dilatación crítica y ha colaborado en los ensayos de resistencia al hielo (salt scaling). Finalmente, I.E. Torroja ha llevado a cabo los ensayos de permeabilidad a los cloruros y colaboró en el equipamiento para el ensayo de fluencia y retracción. Todo

ello ha sido coordinado y controlado por GEOCISA, y supervisado por DRAGADOS OFF-SHORE.

6.7. CONCLUSIÓN

El desarrollo de un hormigón de las características del exigido para el Proyecto Øresund ha supuesto un reto que ha sido resuelto con éxito. Los trabajos realizados han permitido formar a un equipo importante de profesionales en aspectos de la tecnología del hormigón desconocidos en España hasta entonces, lo que permite una mayor competitividad a nivel internacional. ●