

ACCÉSIT

DIQUE FLOTANTE DE ABRIGO REALIZADO EN ALGECIRAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL PUERTO DE MÓNACO (ESPAÑA)

FLOATING BREAKWATER BUILT IN ALGECIRAS FOR THE PORT OF MONACO (SPAIN)

JUAN BARCELÓ LLAUGER. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *DRACE*

FERNANDO HUE GARCÍA. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *DRACE*

LUIS PESET GONZÁLEZ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. *Dragados Obras y Proyectos*

RESUMEN: La ampliación y modernización del Puerto de La Condamine en el Principado de Mónaco ha requerido la utilización de unas soluciones innovadoras, ya que las condiciones geográficas eran incompatibles con las soluciones tradicionales. Parte fundamental de estas obras es un dique flotante de hormigón pretensado y armado, de extraordinarias dimensiones, 352 x 28 x 19 m, elemento principal del nuevo dique de abrigo. El dique está unido al cajón-estribo mediante una rótula con esfera de 2.60 m de diámetro y sujeto por el otro extremo por ocho grandes cadenas a pilotes de acero hincados a profundidades entre 50 y 80 m. El dique fue construido en la Bahía de Algeciras y remolcado por mar hasta Mónaco. Para su construcción se excavó y acondicionó un dique seco temporal de 420 x 80 x 20 m, cuya pared frontal se excavó y dragó para permitir la salida del dique después del llenado del dique seco y la flotación del dique. Dos empresas constructoras españolas han liderado el consorcio que ha construido en España e instalado en Mónaco el mayor dique rompeolas flotante del mundo.

PALABRAS CLAVE: PUERTO, DIQUES, HORMIGÓN PRETENSADO, HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES, REMOLQUE MARITIMO, INSTALACIONES PORTUARIAS

ABSTRACT: The enlargement and modernization of Port Condamine in the Principality of Monaco has required innovative solutions as the prevailing geographical conditions prevented the use of more traditional methods. An essential part of these works consists of an enormous prestressed and reinforced concrete floating breakwater which is 352 m long by 28 m wide and 19 m high which forms the main section of the new sea walls. The breakwater is connected to an abutment caisson pier by means of a 2.60 m diameter ball and socket joint and is secured at the other end by eight large chains attached to sunken steel piles set at depths of between 50 and 80 m. The breakwater was built in the Bay of Algeciras and was towed by sea to Monaco. The breakwater was constructed in a purpose-built dry dock of 420x80x20 m and the front wall was excavated and dredged to allow the launching of the breakwater on the flooding of the dry dock and the floating of the dike. Two Spanish construction companies have led the consortium which has built and installed the largest floating breakwater in the world.

KEYWORDS: PORT, BREAKWATER, PRESTRESSED CONCRETE, HIGH-STRENGTH CONCRETE, SEA TOWING, PORT INSTALLATIONS

1. ANTECEDENTES

En el año 1902 se comenzaron los trabajos del Puerto actual de la Condamine en Mónaco y se terminaron prácticamente en 1914. La historia de la obra comienza hacia 1960. Desde entonces las ampliaciones han sido menores debido a sus escasas posibilidades y es en esta década cuando se empiezan a concebir soluciones de tipo flotante, como la actualmente desarrollada.

Este Proyecto es un ejemplo destacado de los amplios límites que abarca la Ingeniería Civil, ciertamente insospechados hace unos pocos años, transportando de forma limpia y pionera un "pequeño" ingenio de más de 160.000 t a una distancia superior a 1500 km.

Por todo ello destacamos a continuación algunos aspectos donde se conjugan diversas causas y motivaciones de tipo cultural, tecnológico, estético, funcional, social y medioambiental que, unidas

Gracias a las necesidades de un pequeño principado situado en el Mediterráneo, se ha podido aprovechar esta oportunidad para desarrollar una zona marítima con la aplicación de un nuevo sistema de construcción de grandes elementos flotantes de hormigón

por este Proyecto, procedemos a analizar previamente, antes de desarrollar los aspectos más técnicos del propio diseño, construcción, transporte y emplazamiento definitivo del dique.

1.1. IMPORTANCIA SOCIAL Y CULTURAL. INTERRELACIÓN ALGECIRAS-MÓNACO

Mónaco es un país pequeño, con un elevado status social y económico pero con unas dificultades importantes para poder expandirse y, por tanto, desarrollar un sistema portuario y marítimo que le permita alcanzar unas dimensiones adecuadas para captar los visitantes que potencialmente quieren ir al principado.

Por otra parte, la Bahía de Algeciras y por extensión todo el Campo de Gibraltar, es una zona del sur de España con gran capacidad de expansión industrial y, en particular, en el mercado de la Construcción y con vistas a actividades relacionadas con el mar. Son muy pocas las instalaciones portuarias que, estando a una distancia prudencial del Principado, reúnen todas las condiciones necesarias para albergar unas obras de tal magnitud. El grupo de empresas adjudicatario del Dique se comprometió a realizar los trabajos en este lugar.

Por todo ello y gracias a las necesidades de un pequeño principado situado en el Mediterráneo, se ha podido aprovechar esta oportunidad para desarrollar una zona marítima con la aplicación de un nuevo sistema de construcción de grandes elementos flotantes de hormigón.

Tanto en origen (Algeciras) como en destino (Mónaco) la repercusión que ha supuesto para la zona trasciende lo simplemente social, creando un acervo añadido al bagaje cultural y de costumbres existente en el entorno.

De este modo se alcanza un nuevo hito en la zona portuaria de la Bahía de Algeciras, con la posibilidad de un desarrollo industrial adi-

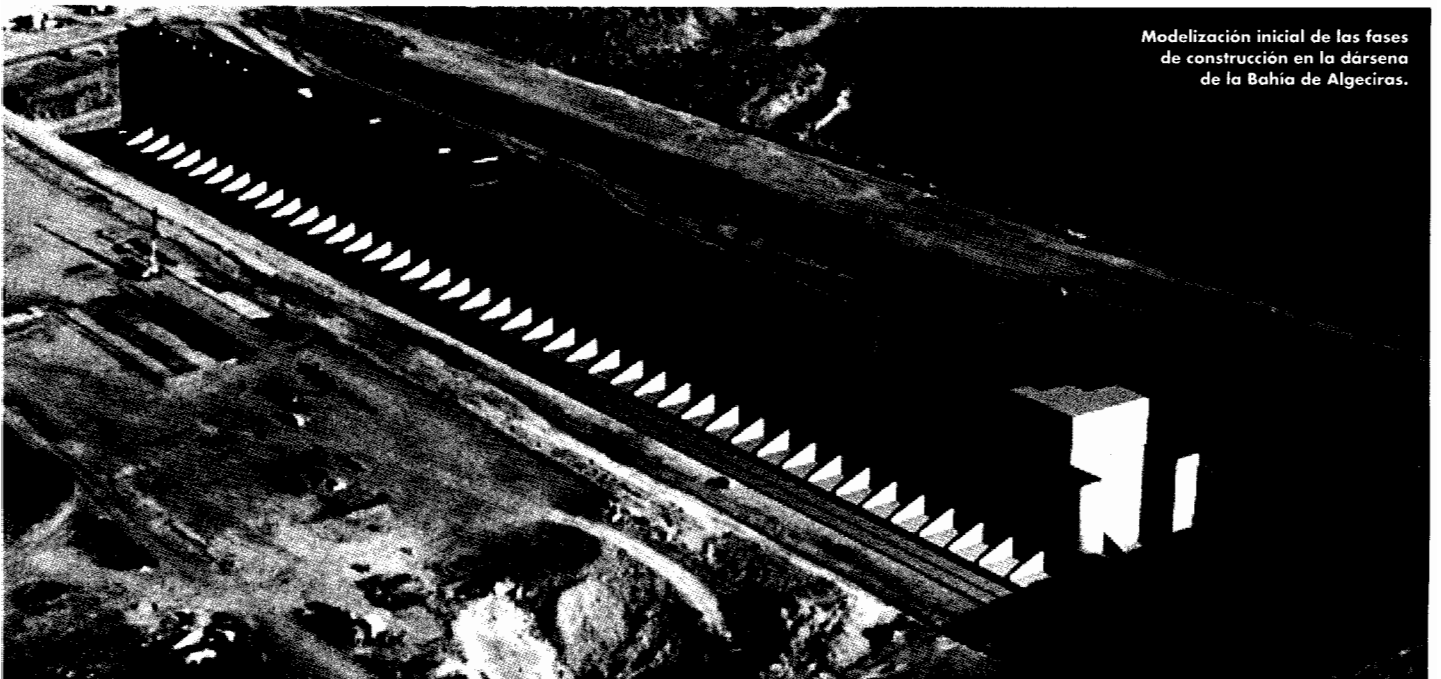
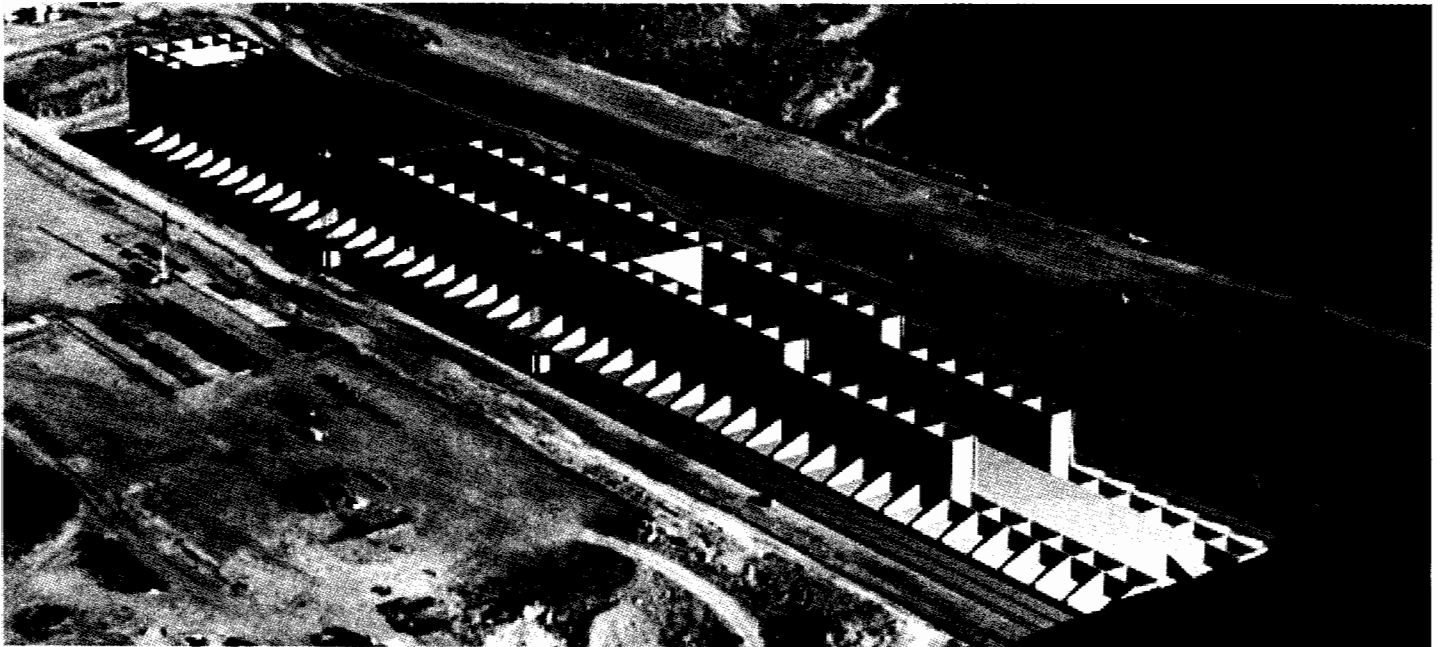
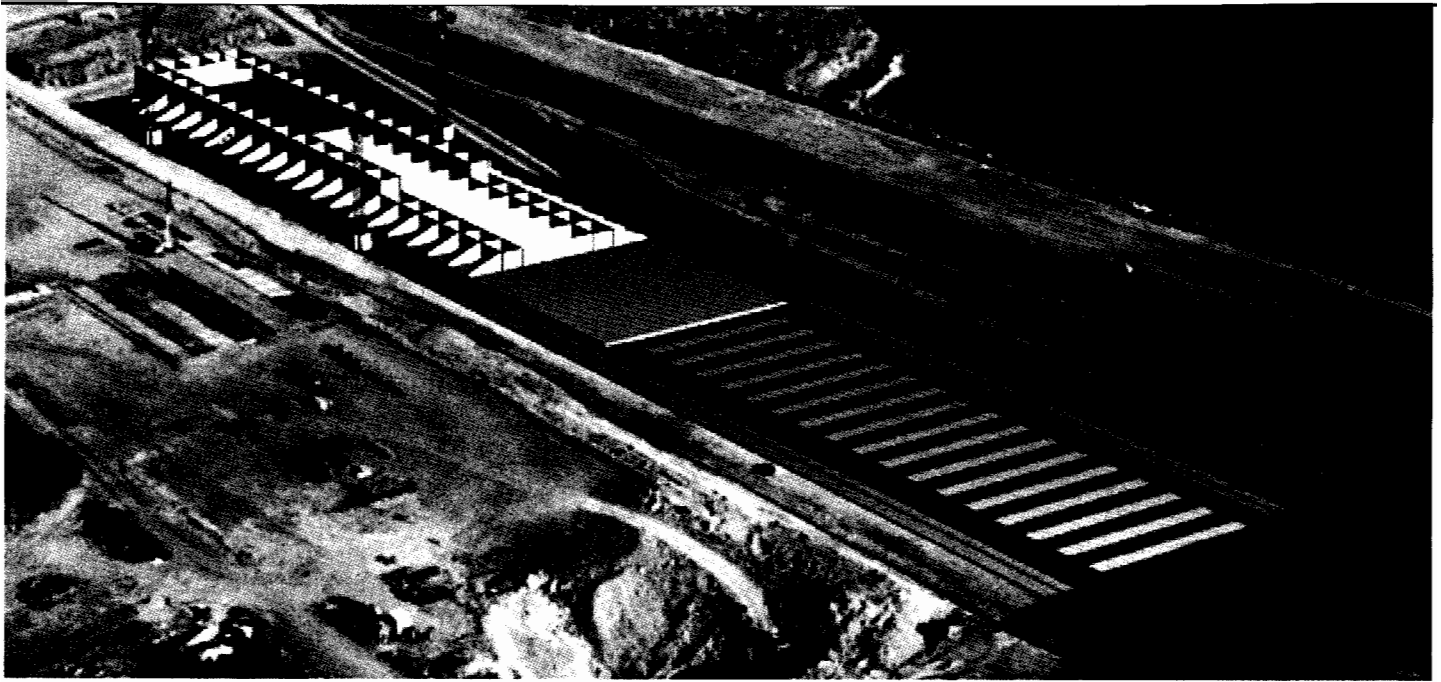
cional que aporta importantes repercusiones en el orgullo y la capacidad tecnológica de la comarca. Se ha abierto un nuevo dique seco, mitad natural y mitad artificial, que permite la construcción de los mayores elementos flotantes del mundo con materiales distintos a los tradicionales, generando un impacto tecnológico, de medios, de recursos y de imagen hacia el exterior de difícil parangón. Las infraestructuras de la zona se han ido transformando y seguirán en esa misma línea gracias a los trabajos realizados y permitiendo un gran auge portuario y de comunicaciones terrestres ligadas a este Proyecto, haciendo olvidar los antiguos astilleros de Crinavis que nunca llegaron a funcionar como tales.

A todo esto hay que añadir las repercusiones que dicho elemento va a provocar en el propio Mónaco, generando una superficie portuaria casi el doble de la actual, mediante un proyecto innovador y distinto, diseñado ante la imposibilidad de realizar la ampliación mediante métodos convencionales. Durante décadas, dicho país no tenía la posibilidad de crecer en ningún sentido debido a sus escasas dimensiones y la enorme dificultad de ganar terreno al mar, debido a las profundidades de su costa. Esta solución flotante permitirá al Principado disponer de una ampliación insospechada de sus espacios, consiguiendo unas zonas importantes, con unas perspectivas muy interesantes de crecimiento.

1.2. IMPORTANCIA TECNOLÓGICA

Como premisa inicial, cabe decir que, este Proyecto no se podría haber llevado a cabo sin los avances tecnológicos alcanzados en el mismo.

Desde la concepción del dique como elemento flotante, pasando por la posibilidad o necesidad de ejecutarse en un lugar distinto al de su utilización y habiendo encontrado una forma original de em-



Modelización inicial de las fases de construcción en la dársena de la Bahía de Algeciras.

La calidad de los acabados ha sido un aspecto de vital importancia, debido a que la estructura es en gran parte de hormigón visto, para mantener la imagen y la innovación del producto como elemento flotante

plear una dársena como dique seco para su construcción, se han ido introduciendo innovaciones técnicas de diseño, en todas las fases del Proyecto.

Destacaremos, sin ser exhaustivos, los siguientes puntos, como novedades a nivel mundial, conjugados en el mismo Proyecto:

- Sistema de anclaje del dique con un elemento articulado (rótula) con novedosos sistemas de construcción y montaje del mismo.
- Sistema integrado de Calidad, en el desarrollo del Proyecto, desde su fase de diseño hasta su total terminación.
- La vida mínima de la obra es de 100 años en todos sus elementos.
- Funcionalidades distintas, integradas en una sola estructura, de forma que se consiguen diversas utilidades, desde dique de abrigo, muelle de atraque de barcos de grandes dimensiones (hasta 200 m), aparcamientos, etc, que serán analizados en otro punto, pero destacando aquí su integración en un solo elemento estructural de grandes dimensiones.
- Instrumentación y diseño de operaciones marítimas innovadoras, tales como el proceso de flotación del cajón, sistema de amarras flexible en la dársena de Algeciras, accesos móviles, seguimiento del transporte, etc.

1.3. IMPORTANCIA ESTÉTICA Y FUNCIONAL

En este punto se debe destacar el tamaño del elemento y su adaptación al medio marino en el que está situado. Estamos hablando de un conjunto de gran esbeltez, con unas proporciones realmente asombrosas. La eslora es de 352 m, con una manga de 28 m en la parte superior y de 44 m en los estabilizadores y rigidizadores inferiores.

ALGUNAS MEDICIONES IMPORTANTES RESPECTO AL DISEÑO, CONDICIONES DE FLOTABILIDAD Y DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA

- Volumen de hormigón43.000 m³
- Peso de acero en armaduras pasivas10.000 t
- Acero activo en cables3.000 t
- Acero activo en barras300 t
- Superficies encofradas120.000 m²

PRINCIPALES UNIDADES DE OBRA REALIZADAS Y CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL LUGAR DE CONSTRUCCIÓN

- Volumen de excavación en el vaciado de la dársena420.000 m³
- Volumen de excavación en roca con voladuras300.000 m³
- Tratamiento de laderas mediante bulonado y gunitado
- Capacidad de achique900 m³/h
- Dimensiones de la dársena:
 - Profundidad15,5 m en pleamar
 - Superficie de trabajo420 * 80 m²
- Sistema de acceso mediante dos rampas de 150 m de desarrollo salvando un desnivel de 18 m.
- Instalaciones:
 - Plantas de hormigón2 Uds. de 60 m³/h de producción
 - Grúas en el dique8 Uds.
 - Parques de ferralla2 Uds.
- Elementos prefabricados

Todo ello se ha diseñado con unas dimensiones de losas y muros muy reducidos, en su espesor, para poder cumplir las condiciones de flotabilidad.

La calidad de los acabados ha sido un aspecto de vital importancia, debido a que la estructura es en gran parte de hormigón visto, para mantener la imagen y la innovación del producto como elemento flotante.

Se trata de una obra emblemática que inaugura un nuevo siglo, creando una moderna imagen y demostrando hasta donde



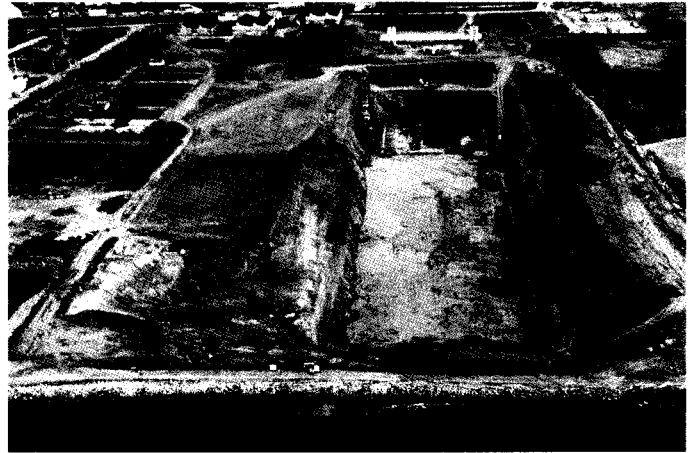
Situación de la dársena.



Cierre de la ataguía y achique.



Excavación de la dársena.



Drenaje y accesos a la dársena.

puede llegar la ingeniería civil en la actualidad. Por ello se han tratado con especial atención todas las superficies vistas, tanto en el exterior como en el interior del dique.

Nunca se podrán olvidar las primeras imágenes del elemento flotando y navegando por la Bahía de Algeciras para realizar las operaciones necesarias de lastrado. Los más de 350 m de estructura, surcando las aguas, ayudan a recordar que estamos hablando de uno de los buques más llamativos de la Historia.

Es necesario destacar el aumento casi total de las funcionalidades obtenidas en la antigua laguna de Crinavis, zona prácticamente inutilizada desde que se paró la construcción de los antiguos diques secos, en los años 70.

Se aumentaron las excavaciones de la laguna en sus dimensiones en planta, llegando hasta la cota $-14,50$ con unas dimensiones de $420 \times 80 \text{ m}^2$, cerrando la entrada de agua y completando el recinto con la realización de una pantalla impermeable en todo su perímetro, que permitía unas filtraciones mínimas, perfectamente controlables, durante la realización de los trabajos en seco.

En su fondo, después de desecada, se construyó una cimentación superficial, formada por unas zapatas transversales cada 8 m sobre las que se ha apoyado el dique durante la construcción. Estas zapatas estaban preparadas para permitir pequeños desplazamientos de la losa inferior, pues al ser pretensada la contracción en 352 m de longitud no es despreciable, y además así se facilitaba la puesta en flotación. El volumen total de excavación fue de 420.000 m^3 . El calado

El dique de abrigo representa una solución con una vocación decididamente innovadora y con escasos precedentes de realización en el mundo

disponible en pleamar era de 15,50 m, suficiente para la flotación del dique terminado.

Además se han ganado terrenos al mar con el material procedente de las excavaciones, obteniendo un ahorro y logrando el desarrollo de un nuevo terminal, para tráfico de contenedores, en esta zona de la Bahía de Algeciras.

En cuanto a las funciones del dique en Mónaco podemos destacar entre otras las siguientes:

- Dique de abrigo del Puerto de Mónaco tanto del actual como de su ampliación.
- Ampliación de la superficie portuaria.
- Nuevos muelles de atraque de buques tanto en su lado interior como en el exterior hasta esloras superiores a los 200 m. De esta forma se permitirá la llegada de grandes cruceros al Principado sin la necesidad de atracar en Niza o fondear en medio del mar.
- Aparcamiento para casi 400 vehículos en su interior con cuatro niveles, túnel de acceso desde el exterior del dique, y rampas entre los distintos niveles permitiendo una descongestión en la circulación en Mónaco.
- Dique seco para embarcaciones de menor tamaño en su interior y almacén para todo tipo de mercancías.
- Zonas comerciales y estaciones marítimas como superestructura del dique. Faro en su extremo. Ampliación en más de 10.000 m² en la superficie.
- Servicios adicionales tales como plataformas de elevación de embarcaciones, ascensores, escaleras, sistemas de ventilación y de protección contra incendios.
- Sistema de lastrado y deslastrado del dique para controlar los calados y escoras y poder realizar el mantenimiento de todos los sistemas bajo el punto de vista naval.

En resumen, en ambos lugares, Bahía de Algeciras y Mónaco se ha logrado una expansión adicional hacia el mar. Estas zonas portuarias ganadas se dedicarán también a actividades de servicios e industriales con interesantes funciones comerciales y de ocio.

1.4. IMPORTANCIA MEDIOAMBIENTAL

En este nuevo siglo no podemos olvidar los aspectos ligados a la conservación de la naturaleza y al mantenimiento de nuestro entorno en su estado más natural.

Durante la ejecución de los trabajos, se ha mantenido un escrupuloso seguimiento de todo un plan mediambiental que impidiese la degradación de la Bahía y su entorno. Así destacamos la forma de ganar terrenos al mar, para próximos proyectos, con los materiales procedentes de las excavaciones, con un riguroso control de los pocos vertidos que se han realizados con las autorizaciones correspondientes, una minimización del impacto en los transportes de los materiales, utilizando incluso medios marítimos para las grandes piezas (rótula, tulipa, etc), una ordenación del tráfico prohibiendo incluso el paso de vehículos por la obra, unas instalaciones compactas en el lugar de los trabajos, etc.

Todo ello devolviendo el entorno a su estado óptimo para continuar con el desarrollo portuario previsto en la zona, disminuyendo el impacto futuro en la ejecución de las nuevas infraestructuras previstas por la Autoridad Portuaria.

Debemos resaltar, por otro lado, que la ejecución de esta singular infraestructura, viene motivada por la dificultad, si no imposibilidad, de realizar diques a profundidades cercanas a los 60 m, que supondrían la excavación de montañas enteras para obtener la escollera (inviabiles tanto técnica como mediambientalmente). Por tanto la solución aportada con este prototipo, servirá como modelo de



respeto al Medio Ambiente, en cualquier futura ampliación portuaria de gran calado.

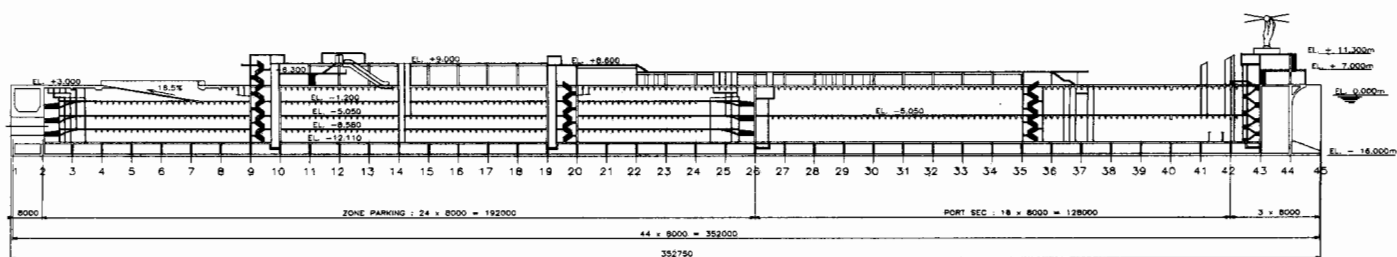
Se obtiene así una solución nueva, ensayada en modelos, para amortiguar el oleaje y servir de dique en los puertos que evita los grandes movimientos de vehículos pesados muy agresivos con el medio, en las ciudades portuarias, proporcionando una obra mucho más ligera, con un ahorro importante de materiales y ejecutada, en su mayor parte, en zonas preparadas al efecto.

2. DESCRIPCIÓN DE LA AMPLIACIÓN DEL PUERTO DE MÓNACO

Se pretende lograr el abrigo del área de antepuerto creada, mediante dos grandes construcciones:

- Un dique de abrigo rompeolas de una longitud total de 490 m, compuesto por distintos cajones de hormigón pretensado
- Un contradique que completa la protección del antepuerto y flanquea la futura bocana de acceso.

El dique de abrigo representa una solución con una vocación decididamente innovadora y con escasos precedentes de realización en el mundo. Está compuesto por el estribo y por el dique flotante. El estribo está formado por un cajón principal, que constituye el estribo propiamente dicho, fondeado a la cota 40,0 m, de planta trapezoidal, con un puntal de 48,0 m y unas dimensiones en superficie de 69,4 m x 22,0 m. Este cajón, a su vez, sirve de apoyo a otros dos que semejan, cada uno de ellos, la viga de un puente, y que tienen el extremo opuesto apoyado en roca excavada en el Pe-



Sección longitudinal del dique flotante.

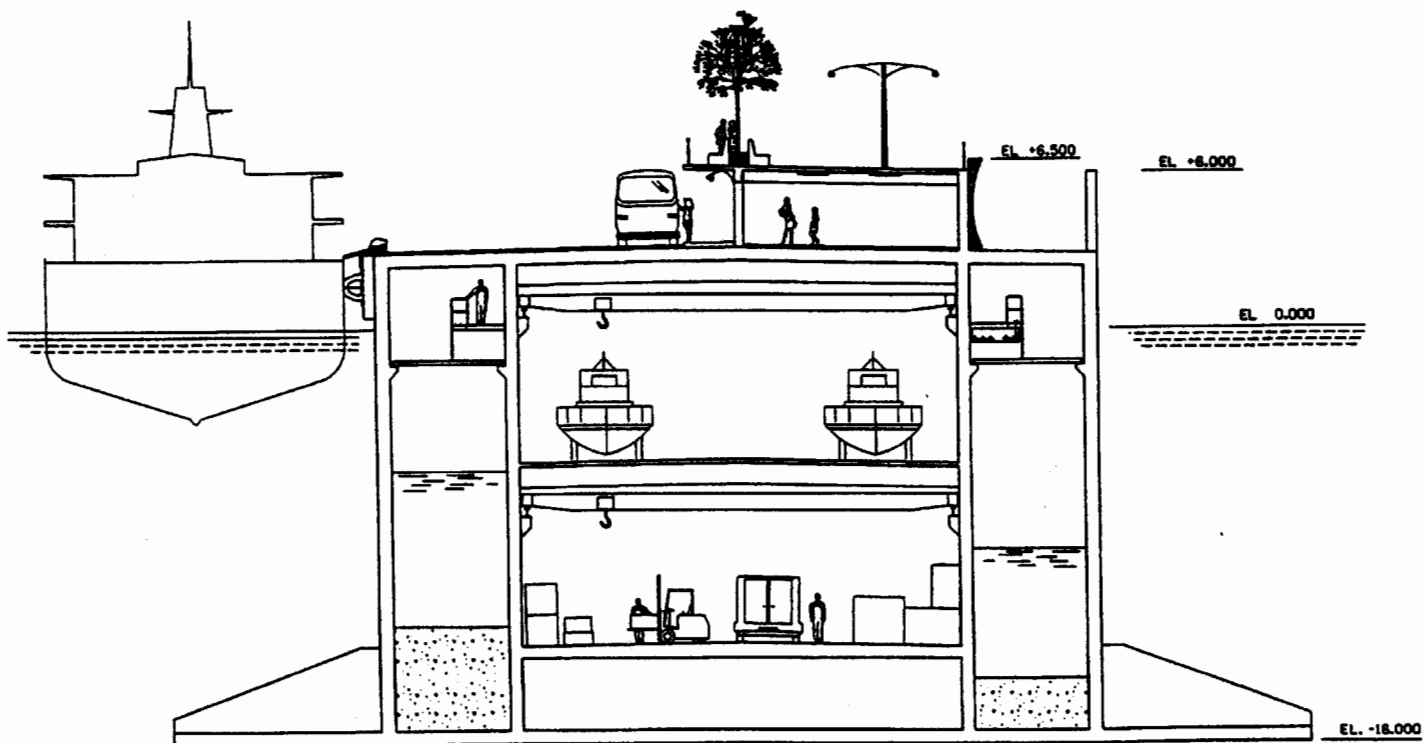
ción del Forte Antonio I, extremo del macizo rocoso donde está asentado el Viejo Mónaco.

El cajón del lado mar tiene su apoyo a la cota -17,50 m y del lado puerto a la cota -10,50 m. El recinto delimitado por estos tres cajones se ha cerrado mediante gaviones de grandes dimensiones, que han permitido rellenar el interior y crear una superficie de tierra antes inexistente. Los tres cajones son de hormigón pretensado con armaduras postesas. El conjunto de obras del estribo ha sido construido por empresas francesas, realizando los cajones en Francia y remolcándolos hasta Mónaco para su instalación.

3. DESCRIPCIÓN DEL DIQUE FLOTANTE

El principal elemento del dique de abrigo es el dique semiflotante, un cajón de hormigón armado y pretensado, con un desplazamiento total en servicio de 166.000 t, Una eslora de 352 m, una manga de 28 m y un puntal de 19 m, 24,5 m si se incluyen las superestructuras.

La energía del oleaje incidente será absorbida mediante una solución singularmente atrevida e innovadora. Debajo del dique flotante se forma un colchón de agua que amortigua la energía del



Sección transversal del dique flotante.



Simulación por ordenador del dique flotante terminado.

oleaje, pasando sólo una parte muy pequeña de ella al interior del puerto. Para ello, la losa inferior del dique se prolonga a ambos lados hasta una manga total de 44 m.

El Proyecto de Construcción que ha desarrollado el Anteproyecto de Licitación para la construcción de este dique semiflotante y su conexión con el estribo, han sido realizados por una unión temporal de empresas liderada por dos empresas españolas.

4. DISEÑO DEL DIQUE FLOTANTE

Al margen de prestar las funciones principales ya mencionadas, el dique asumirá un papel determinante en la actividad portuaria. Su interior servirá de aparcamiento para casi 400 vehículos en cuatro niveles en la mitad próxima al estribo, y de almacén de mercancías y pequeñas embarcaciones en dos niveles, en la otra mitad.

Estará provisto de un faro en su extremo Norte. La estructura de coronación (espaldón) alojará la futura estación marítima, así como distintos paseos peatonales y calzadas para la circulación rodada. Un muro exterior con forma almenada protegerá a personas y vehículos del oleaje.

La vida útil prevista para la obra es de 100 años. Esta inusual cifra ha condicionado en gran medida los criterios de diseño y de construcción, lo que se ha traducido en exigentes especificaciones para los suministros de materiales y procesos de ejecución.

5. CONEXIÓN DEL DIQUE FLOTANTE AL ESTRIBO

Un dique totalmente flotante en servicio tendría como mínimo los movimientos verticales impuestos por las mareas, además de los causados por el oleaje. La conexión del dique flotante con el estribo de tierra firme tendría que ser flexible para permitir estos movimien-

La conexión del dique flotante con el estribo de tierra firme tendría que ser flexible para permitir estos movimientos. La solución adoptada para limitarlos ha sido construir un dique semiflotante, uniéndolo al cajón del estribo mediante una articulación en forma de rótula, de tal modo que la flotación del dique no sea libre

tos. La solución adoptada para limitarlos ha sido construir un dique semiflotante, uniéndolo al cajón del estribo mediante una articulación en forma de rótula, de tal modo que la flotación del dique no sea libre. Así el dique sólo tendrá tres de los seis grados de libertad posibles en un sólido flotante y se puede amortiguar la energía del oleaje sin movimientos importantes en el dique.

En el extremo opuesto a tierra, en el lado del faro, las traslaciones del dique están limitadas por 8 cadenas tensadas, sujetas al terreno. Cinco de ellas del lado del mar y tres del lado del puerto, todas ellas ancladas a pilotes metálicos hincados a profundidades entre 50 y 80 m. Además, por seguridad en caso de rotura de la rótula, el dique tiene dos cadenas, una por cada lado, en el extremo del lado de tierra.

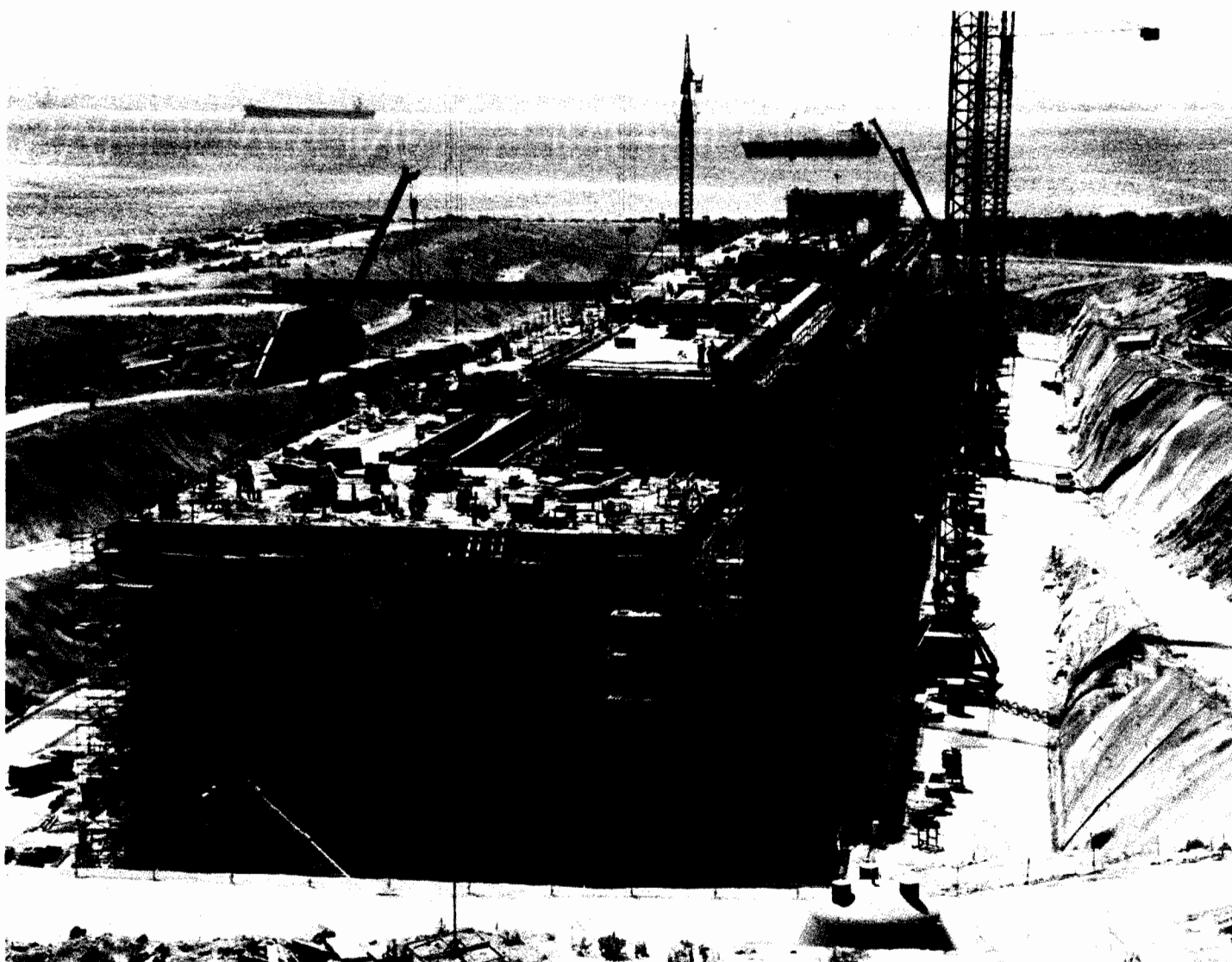
La rótula de conexión con el cajón estribo constituye por lo tanto uno de los componentes esenciales de la estructura. Está constituida por una pieza metálica de revolución de sección en segmento circular (de color azul en la figura), de 2,60 m de diámetro que forma la pieza interior de la rótula esférica propiamente dicha. Está encastrada en el extremo de una pieza de forma aproximadamente troncocónica (de color gris en la figura), de 6,40 m

de diámetro en la base, unida de forma rígida al dique flotante mediante barras de pretensado. Esta pieza está apoyada en una pieza de asiento (de color marrón claro en la figura), de 7,00 m de diámetro en la base, colocada en el interior de un hueco dejado en la pared frontal de hormigón de dique. Esta pieza a su vez se apoya en una brida de 7,00 m de diámetro hormigonada en el interior de la pared. Las barras de pretensado de sujeción se anclan en una contrabrida del mismo diámetro. Brida y contrabrida están unidas por un tubo de 3,00 m de diámetro, provisto de dos esclusas para acceso al interior de la rótula. El espesor de esta zona de hormigón es de 9,00 m. La pieza exterior que rodea a la rótula (de color verde claro en la figura), tiene forma troncocónica de 4,00 m de diámetro máximo. Todos estos elementos se montaron en el dique y se protegieron mediante una cubierta metálica de chapa.

La pieza exterior que rodea a la rótula se inserta en un cajón metálico cuadrado (de color marrón claro en la figura), con un alojamiento troncocónico que se ajusta a ella, instalado previamente en el estribo, y se fija a este cajón mediante pernos pretensados. También este cajón tiene una cámara y un tubo provisto de dos esclusas para acceso al interior de la rótula y poder colocar y pretensar los pernos de sujeción en la maniobra de conexión.



Simulación por ordenador del conjunto de la rótula de conexión.



Fase de construcción final con la rótula encastrada

6. CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE FLOTANTE

6.1. MATERIALES EMPLEADOS

En la construcción del dique se han empleado 44.000 m³ de hormigón, 3.500 t de acero de pretensado y 10.000 t de acero de armar. El hormigón principal es de 54 MPa de resistencia característica a compresión y 3,84 MPa a tracción y el secundario 40 MPa y 3 MPa respectivamente. Para asegurar una durabilidad de 100 años el hormigón se ha fabricado con un cemento al que se le añadía en fábrica humo de sílice para garantizar su homogeneidad. Las losas y muros que forman el doble casco del dique están preten-

sados en las dos direcciones, con cables colocados en el interior de tubos de acero empleados como vainas. Las tolerancias de colocación de armaduras, especialmente en recubrimiento han sido muy estrictas y los separadores fabricados con el mismo cemento y áridos.

6.2. INSTALACIONES DE OBRA

Las especificaciones de los materiales a utilizar, y los procedimientos de construcción para este proyecto son muy diferentes de los habituales en las obras civiles. Como consecuencia de ello fue necesario realizar unas instalaciones que permitiesen elaborar o



Plantas de hormigón.

conformar en obra todos los materiales utilizados. En las proximidades de la dársena, y dentro del recinto de Crinavis, se acondicionaron 50.000 m² de terreno para albergar todas las instalaciones de obra.

6.2.1. Achique de la dársena

Para evacuar las pequeñas filtraciones que se producían en la dársena, así como las aguas pluviales y por motivos de seguridad, se instaló un sistema de bombeo que constaba de una piscina decantadora y 3 bombas de inmersión, de las cuales dos estaban de reserva, con una capacidad de evacuación de 300 m³/h cada una, y un conducto de evacuación, que en caso de necesidad permitía que todas las bombas trabajasen en paralelo.

6.2.2. Fabricación de hormigón

El hormigón se fabricó en dos centrales automáticas que se instalaron a pie de obra, ambas con amasadora de eje vertical a contracorriente de 2 m³ y con una capacidad de producción de 60 m³/h cada una. Cada una de las centrales iba equipada con dos silos de cemento para una capacidad de 250 t. Ambas centrales, disponían de una zona de acopio de áridos, estando bajo techado el árido fino.

6.2.3. Elaboración y prefabricado de ferralla

La obra disponía de dos parques de ferralla con capacidad de producción de 600 t/mes entre ambos. Dichos parques estaban dotados de una zona de acopio cada uno para unas 600 t y disponían de sendas grúas torre y todos los elementos para conformar el acero. Uno de los parques estaba dedicado a la elaboración de las armaduras verticales y el otro a la elaboración de las armaduras horizontales. En ambos casos el prefabricado incluía el preposicionamiento de las vainas para las armaduras activas.



Parques de ferralla.

6.2.4. Parque de encofrados

El parque de encofrados estaba dotado de una carpintería y diversas zonas de acopio y montaje de los encofrados utilizados en la obra:

- 16000 m² de encofrados para la solera.
- 13500 m² de encofrado trepante para los alzados.
- 3000 m² de encofrados diversos para la superestructura.
- 17000 Ud de puntales.
- 17000 Ud de cerchas de arriostamiento.
- 900 Ud de cerchas para cimbrado.

6.2.5. Zona de ensayos escala 1:1

Para garantizar que los métodos de ejecución permitían alcanzar las exigencias del pliego en cuanto a calidad y tolerancias, se realizaron una serie de ensayos a escala 1:1, para lo cual se habilitó una zona:

- Embutido de la rótula en el hormigón, para lo cual se construyó una réplica de los elementos embebidos de la rótula en madera forrada con chapa metálica y se realizó una réplica de la zona del dique afectada.
- Encofrados trepantes de muros: se hizo una réplica de la zona más densa en armaduras pasivas, activas, piezas embebidas y huecos, para verificar su funcionamiento.
- Encofrado de losas: se hizo una réplica de la zona más densa en armaduras pasivas, activas, piezas embebidas, huecos y dificultad de desencofrado para verificar su funcionamiento.
- Ensayos de inyección de lechada para cables de pretensado (tubos verticales)
- Inyección de un cable de 250 m de longitud y 32 torones, con el trazado más sinuoso para simular las condiciones reales de inyección.

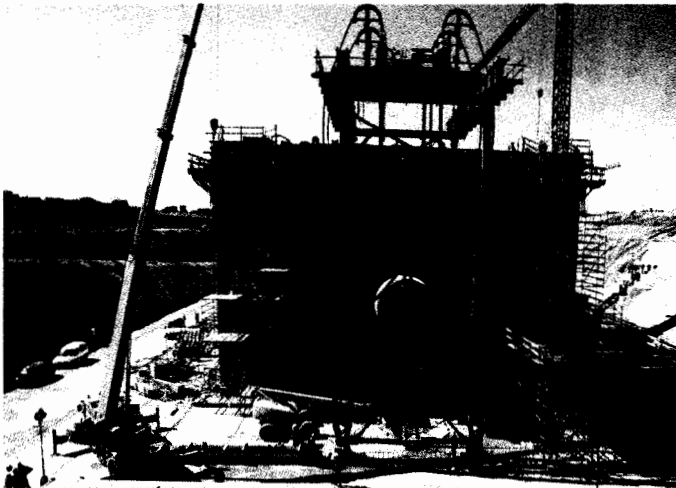


Rótula. Izado de elementos embebidos.

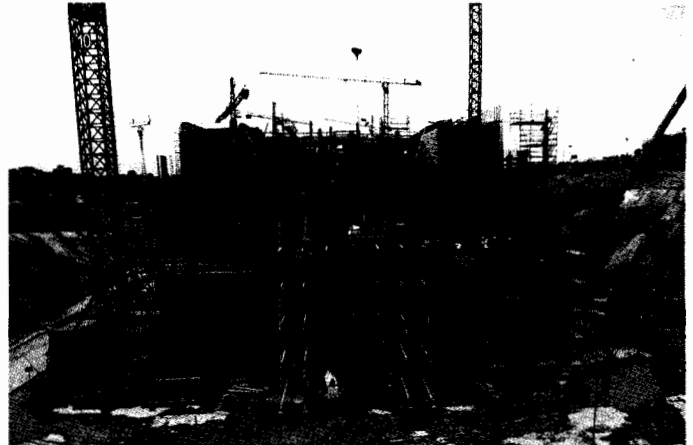
6.2.6. Posicionamiento de los elementos de la rótula.

Para posicionar los diferentes elementos de la rótula, se realizaron tres instalaciones que permitieran alcanzar las estrictas tolerancias requeridas:

- Izado de los elementos embutidos en el hormigón, el peso máximo de izado fueron 190 t. La estructura estaba formada por unos pórticos apoyados en el fondo de la dársena y en el propio dique, sobre los cuales deslizaba una viga para recoger la pieza del convoy de transporte, izarla y trasladarla a su posición de hormigonado.
- Apuntalamiento de los elementos embutidos en el hormigón durante el hormigonado.
- Izado del resto de elementos, cuyo peso máximo de izado fueron 390 t.



Rótula. Izado del resto de elementos.



Rótula. Puntol de elementos embebidos

6.2.7. Medios de elevación.

Para cubrir todas las zonas de trabajo en el dique, en el fondo de la dársena se instalaron 8 grúas torre con una capacidad de 200 t/m y 42 m de radio, y con los correspondientes caminos de rodadura para su desplazamiento en el sentido longitudinal del dique.

6.2.8. Redes energía eléctrica, alumbrado, agua y evacuación de agua.

Se instalaron redes de energía eléctrica, alumbrado, agua y evacuación de agua para permitir el funcionamiento de todos los tajos e instalaciones auxiliares estos servicios. Esta última instalación de evacuación de agua es independiente de la de achique de la dársena descrita anteriormente y desemboca en ella: al estar el dique formado por recintos estancos, a medida que avanza la construcción, todas las aguas de lluvia o de curado del hormigón quedan almacenadas en cada uno de los módulos y han de bombearse al exterior del dique.

Estas redes fueron muy extensas ya que al existir turno de noche, aparecer zonas cerradas y estancas con la evolución de los trabajos, y al intervenir escalonadamente las diferentes fases de ejecución en cada uno de los tajos, las redes hubieron de dimensionarse para tener terminales en todos los tajos y que dichas terminales fuesen operativas desde el inicio del tajo hasta el final de la obra:

- Energía eléctrica: 6.000 kW de potencia instalada y 19.000 m de cables eléctricos de diversas secciones y 120 cuadros eléctricos de diversas potencias.
- Alumbrado: 720 puntos de iluminación de 1000 W.
- Agua: 100 m³/h de capacidad de caudal de agua, con 3.500 m de tuberías de diámetro diverso.

- Bombeo: 36 puntos de bombeo con 720 m de tubería de evacuación

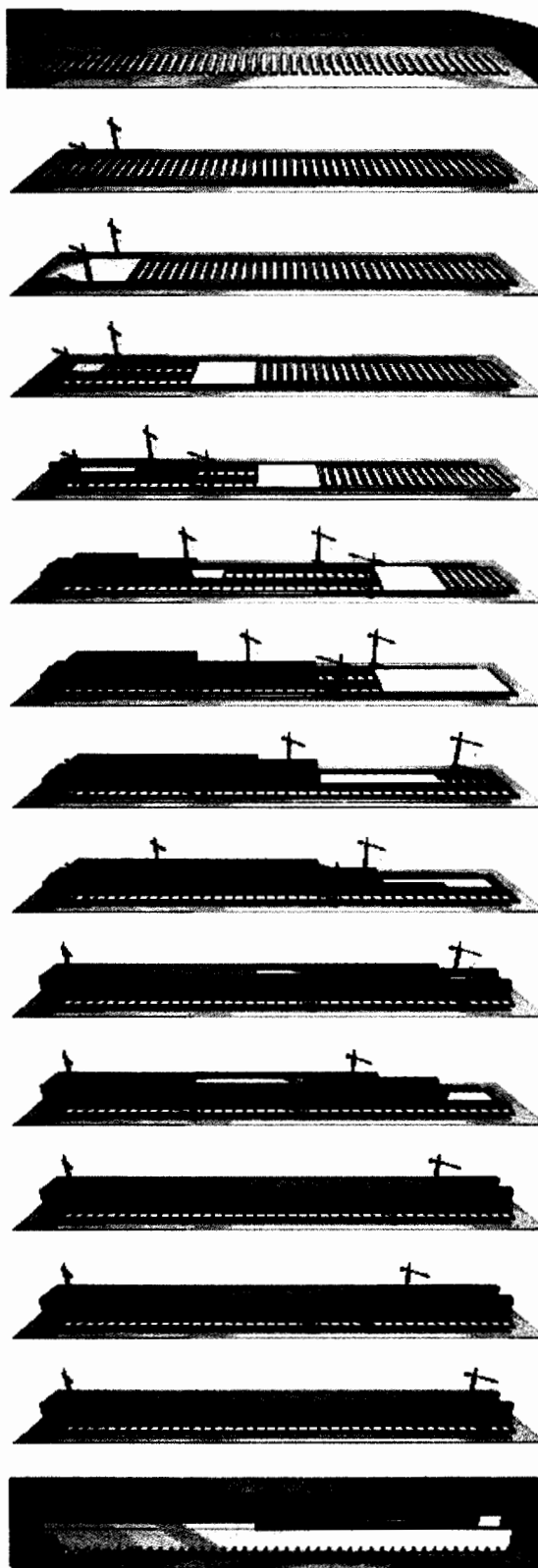
6.3. FASES DE CONSTRUCCIÓN Y MEDIOS UTILIZADOS

Para su construcción, el dique se dividió en 8 módulos (plots), 7 de ellos con 48 m de longitud y uno, el correspondiente a la zona de la rótula, de 16 m, completando los 352 m de longitud del dique. En todos los módulos, excepto en el primero que es muy diferente por alojar la rótula, el proceso de construcción se repetía.

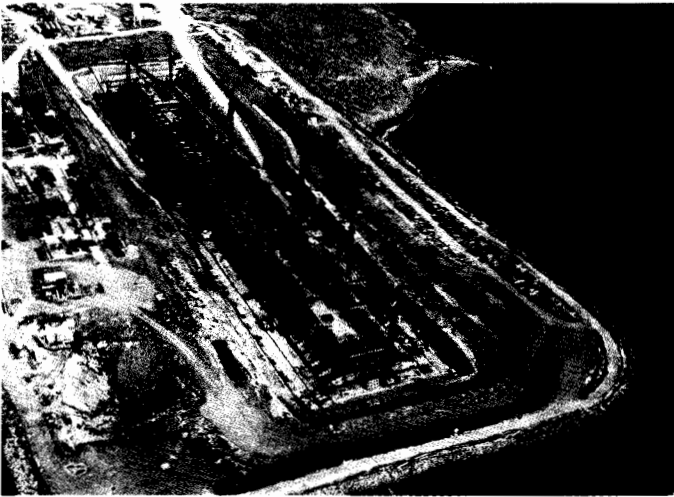
Primero se construía la losa inferior y sobre ella la primera altura de los muros longitudinales y luego los contrafuertes de las zonas exteriores de la losa inferior y los muros transversales de compartimentación de la cámara inferior, terminando con la losa intermedia a la cota -12 m para cerrar esta cámara. Se seguía con las siguientes elevaciones de los muros longitudinales y de los transversales entre ellos de las cámaras laterales hasta llegar a la coronación del dique en cuatro fases de 3,50 m cada una. Esto formaba el casco del dique.

Las fases de ejecución vienen condicionadas por las juntas de hormigonado. Para facilitar la ejecución de la obra se establece un procedimiento escalonado de ejecución, tomando como unidad de medida el plot o módulo:

1. Losa inferior (-16)
2. Muros verticales entre la losa -16 y la losa -12
3. Losa -12
4. 4 Trepas para los muros verticales entre la losa -12 y la +3
5. Estabilizadores (una vez comenzada la 3ª trepa)
6. Losa +3



Simulación de las fases de ejecución.



Vista de dos fases de la construcción del dique

Posteriormente, en el interior del dique, se construyeron los forjados intermedios del aparcamiento y del puerto seco mediante vigas pretensadas y prelosas armadas prefabricadas sobre las que se hormigonaba la mitad superior de la losa y el resto de elementos auxiliares interiores (rampas, cajas de ascensores, escaleras, conductos de ventilación, etc.). Por último se hormigonaba la losa superior de cierre a la cota +3 m sobre encofrado apeado. El dique se finalizó con la construcción de la superestructura (túnel de acceso, edificios, etc.).

La gran cantidad de materiales y encofrados a mover, las dimensiones del dique y el corto plazo de ejecución obligaron al empleo de diez grúas torre, que se desplazaron por el dique seco conforme se avanzaba la construcción del dique. Las grandes grúas se utilizaron para el movimiento de los cazos de hormigón, de las grandes jaulas de ferralla prefabricada que ya llevaban los tubos de vaina de

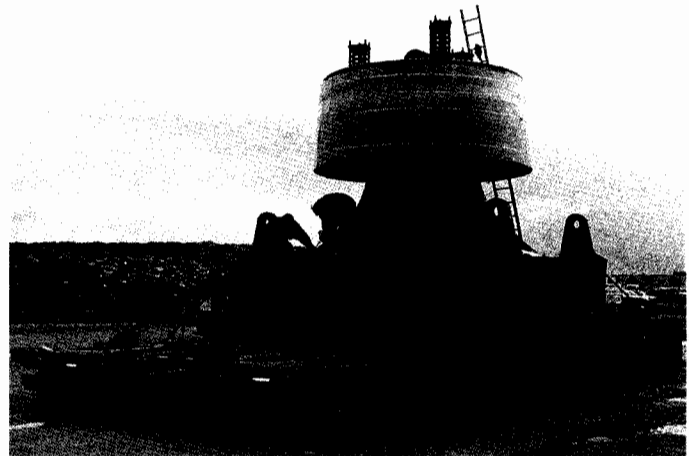
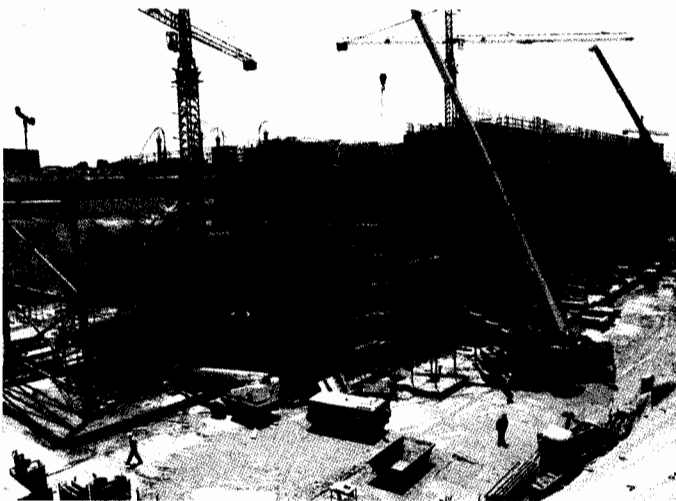
pretensado y de los paneles de encofrado. Se llegaron a utilizar simultáneamente en la construcción del dique hasta 20.000 m² de paneles de encofrado.

Los forjados intermedios del aparcamiento se construyeron mediante 153 vigas pretensadas, de 16,9 m de longitud y 0,90 m de canto, y 6.615 m² de prelosas prefabricadas de 7 cm de espesor. En el almacén de mercancías o puerto seco se utilizaron 38 vigas y 1.700 m² de prelosas. Todos estos elementos se prefabricaron en una factoría en las cercanías de la Estación de S. Roque (Cádiz), no lejos de la obra.

El hormigonado de la losa superior de cierre a la cota +3 m se hizo "in situ". Su peso era muy elevado debido a su espesor de 0,65 m, con varias zonas de refuerzo de 1,30 m. Se dispuso un encofrado apeado sobre puntales estándar de aluminio de 5 t de carga útil,



Vistas de detalle de la construcción del dique



Vistas de la brida colocada y del transporte de la rótula

apoyados en las tres losas de aparcamiento intermedias ya construidas, y al final, en la losa a la cota -12 m que forma el cuarto nivel de aparcamiento.

La flexibilidad de los puntales de apeo hacía que se transmitieran cargas a todos los niveles de aparcamiento, superiores a las máximas que podían soportar pues la sobrecarga de cálculo es de 2,50 kN/m². Se estudió con detalle la relación de rigidez entre losas y puntales, para que las losas no recibieran cargas y deformaciones que no fueran admisibles. En algunas zonas hubo que disponer elementos de conexión entre puntales a través de orificios practicados en las losas, para evitarles transmisión de cargas no admisibles. Se llegaron a utilizar simultáneamente en la construcción del dique hasta 6.000 puntales.

6.4. MONTAJE DE LA ROTULA

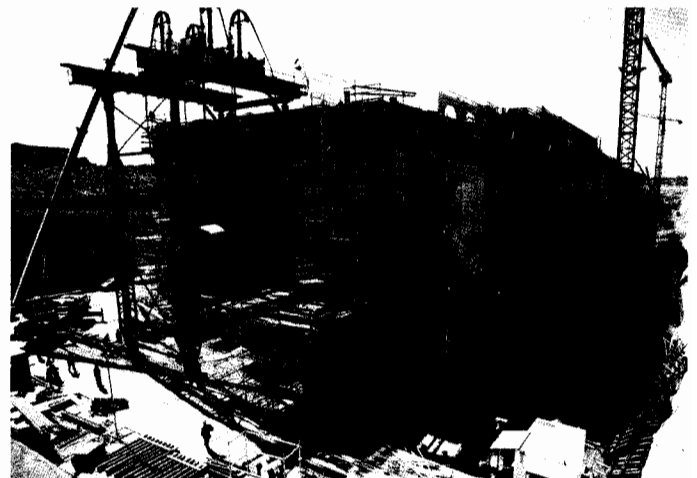
El montaje de la rótula se realizó en diferentes fases. En una primera se montó la contrabrida de 7,0 m de diámetro exterior, 4,4 m de diámetro interior y 300 mm de espesor, después la chapa de asiento de la rótula de 7,0 m de diámetro exterior, 3,0 m de diámetro interior y 60 mm de espesor con rigidizadores, y por último, el tubo de conexión entre ambos elementos de 3,0 m de diámetro exterior y 6,9 m de longitud.

Delante de la placa de asiento se colocó un encofrado circular de 7,0 m de diámetro exterior y 1,75 m de longitud para alojar la pieza de asiento de la rótula. A continuación se colocaron los 60 tubos de 135 mm de diámetro, entre brida y placa de asiento, necesarios para alojar las barras de sujeción de la rótula y la ferralla de la zona, muy

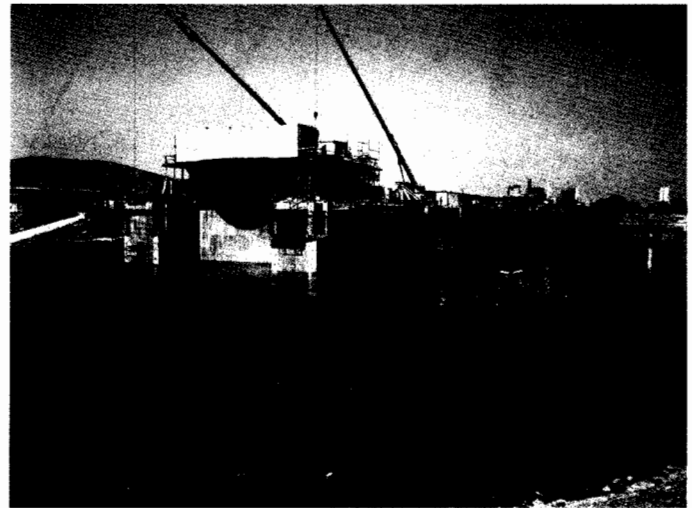
complicada debido a las formas curvas y a la gran cantidad de barras a disponer.

El hormigonado de esta zona se hizo en varias tongadas, con la placa de asiento sujeta por una estructura metálica rígida, para evitar deformaciones en esta placa que estaba mecanizada con precisión. Se estudiaron mediante elementos finitos las deformaciones de la brida durante las fases de hormigonado. Para evitar deformaciones por diferencias de temperatura entre zonas soleadas y zonas en sombra, se montó un entoldado sobre una estructura apoyada en la de sujeción de la brida.

En una segunda fase, con el dique ya muy avanzado, se montó primero la pieza de asiento de la rótula, de 7,0 m de diámetro exterior y 150 t de peso, sujetándola con una estructura metálica auxiliar y un contrapeso, ya que se tenía que colocar en el hueco de la pared,



Vista del montaje de la rótula



Vistas del acceso provisional y del sistema de llenado de la dársena.

y por último, el conjunto de la rótula con sus conos de asiento en dique y estribo, con un peso de 650 t. Para todas estas operaciones se montaron dos estructuras metálicas auxiliares, una para cada fase y se izaron las piezas mediante gatos y cables. En una tercera fase se colocaron y tensaron por el interior del dique las 60 barras de 120 mm de diámetro de sujeción de la rótula.

7. PUESTA A FLOTE DEL DIQUE

7.1. ACCESO PROVISIONAL

Con la dársena inundada no se tenía acceso al dique sin el uso de medios flotantes complicados de utilizar. Para poder continuar los trabajos de la superestructura y otros detalles pendientes se instaló una pasarela para admitir el paso de camiones de hasta 32 t de peso total. Tenía una luz de 39,3 m, un ancho de 3 m y un peso de 60 t, entre un lado de la dársena y el dique. Estaba construida con paneles tipo Acrow o de puente Bailey, como los utilizados por el ejército para puentes provisionales. Son elementos metálicos modulares, de fácil montaje y desmontaje. Para permitir movimientos del dique en flotación, 2 m en dirección horizontal y las subidas y bajadas de la marea, se hizo un diseño especial.

7.2. INSTRUMENTACIÓN DEL DIQUE

La propiedad exigió comprobar que durante el remolque a Mónaco y la instalación allí, no se producían daños en su estructura. Se re-

quería controlar los movimientos y deformaciones del dique, para verificar que los esfuerzos producidos durante esas fases, momentos flectores y torsiones, estaban dentro de los márgenes admisibles y no superaban los de cálculo en servicio.

Para medir las deformaciones y calcular los momentos transversales, tanto en planos verticales como horizontales, se instalaron tres secciones de medida, una en el centro del dique y dos a cuartos de la longitud. Cada sección tenía 13 extensómetros longitudinales de fibra óptica de gran base, dos servoclinómetros, uno longitudinal y otro transversal, y resistencias PT-100 para medir la temperatura, ocho en la sección central y cuatro en las otras dos secciones. Los efectos del mar se registraban mediante tres sensores de presión estática en cada lado, para medir el calado, y 18 de presión hidrodinámica, 5 en proa, 5 en popa y 4 en cada costado. Los niveles de agua de lastre en las doce cámaras se midieron con un sensor de presión en cada una de ellas. Las deformaciones durante la fase de puesta a flote se controlaron instalando a cada lado de la dársena una estación total motorizada que leía la posición de siete prismas instalados en el correspondiente costado del dique.

7.3. LLENADO DE LA DÁRSENA Y PUESTA A FLOTE DEL DIQUE

Para poner a flote el dique se llenó la dársena con agua del mar mediante un sifón de tubería de 750 mm de diámetro, pasando por la parte superior del dique de contención y bajando hasta la cota aproximada de -7 m. El llenado del sifón se realizó haciendo el vacío mediante una bomba de succión. La longitud total de tubería fue de 95 m y el tiempo de llenado, en funcionamiento continuo, de 3 días.



Vistas del dragado y de la salida del dique de la dársena.

El llenado se hizo en dos fases. Una primera hasta un calado de 11 m, donde se interrumpió para permitir la inspección y verificación de su estanqueidad de las cámaras situadas entre las dobles paredes laterales. Anteriormente ya se habían verificado, llenándolas interiormente hasta una altura de 10 m, máxima admisible, pues las paredes estaban diseñadas para resistir mayores presiones de agua por el lado exterior. Una segunda fase completó el llenado de la dársena y la flotación del dique, verificando de nuevo la estanqueidad de las paredes, con agua las zonas superiores no comprobadas y con mayor presión de agua las ya inspeccionadas. La puesta a flote se realizó con un calado de 13,5 m.

7.4. SALIDA DEL DIQUE DE LA DÁRSENA

Una vez realizadas las pruebas de estanqueidad con la dársena llena y el dique a flote, se procedió a la demolición del cierre de la dársena, y al dragado de un canal exterior de 80 m de anchura con un calado de 15 m. Para ello se realizó una excavación con equipos terrestres de 20.000 m³ y un dragado de 80.000 m³ y de éstos 15.000 m³ con explosivos y microvoladuras para asegurar la integridad de la estructura.

La delicada maniobra de salida de la dársena se realizó tirando primero con un remolcador de 60 t de tiro y luego con tres situados en la proa o lado faro del dique. Otros dos remolcadores se fueron abarloado a los costados del dique, a medida que este abandonaba la dársena, para mantener el rumbo. Cuatro cabrestantes situados en los costados de la dársena, dos con doble tambor de 100 t de tiro cada tambor y dos simples de 50 t de tiro y dos más de 15 t de tiro si-

tuados en el lado de la rótula, permitieron mantener controlado en todo momento el dique. Además seis grandes bolardos sirvieron de apoyo en las distintas enmendadas que tuvieron lugar durante la maniobra. Una vez el dique fuera de la dársena, fue movido por cuatro remolcadores actuando sobre las esquinas del dique.

El dique fue fondeado en el muelle de descarga de carbones de la C.T. Los Barrios, para lastrarlo con unos 16.000 m³ de agua dulce en el interior de las cámaras entre paredes laterales, hasta alcanzar un calado de 15 m necesario para la navegación hasta Mónaco. Se utilizó un barco con doce bombas de 120 m³/h de caudal, utilizando simultáneamente siete de ellas. También se hicieron las últimas verificaciones de estanqueidad.



Lastrado del dique en el muelle de la C.T. Los Barrios.

El dique llegó a Mónaco después 279 horas de navegación, algo menos de 12 días, y de un recorrido de 816 millas náuticas, unos 1.500 km, a una velocidad media diaria entre 2,5 y 3,5 nudos

8. REMOLQUE DEL DIQUE AL PUERTO DE MÓNACO

Para la elección de la ruta de remolque se tuvieron en cuenta numerosos factores, oleaje, corrientes, vientos predominantes y las posibles condiciones meteorológicas. Las rutas que pasaban entre la península y las Islas Baleares estaban más abrigadas, pero en caso de fallo del sistema de remolque eran más peligrosas si el dique quedaba a la deriva, por la mayor densidad de barcos navegando y la cercanía a costas. Por ello se eligió una ruta que dejaba al oeste las Islas Baleares. El dique llegó a Mónaco después 279 horas de navegación, algo menos de 12 días, y de un recorrido de 816 millas náuticas, unos 1.500 km, a una velocidad media diaria entre 2,5 y 3,5 nudos.

De la popa o lado rótula del dique tiraba un remolcador de 75 m de eslora, 22.000 hp de potencia y 180 t de tiro, con un cable



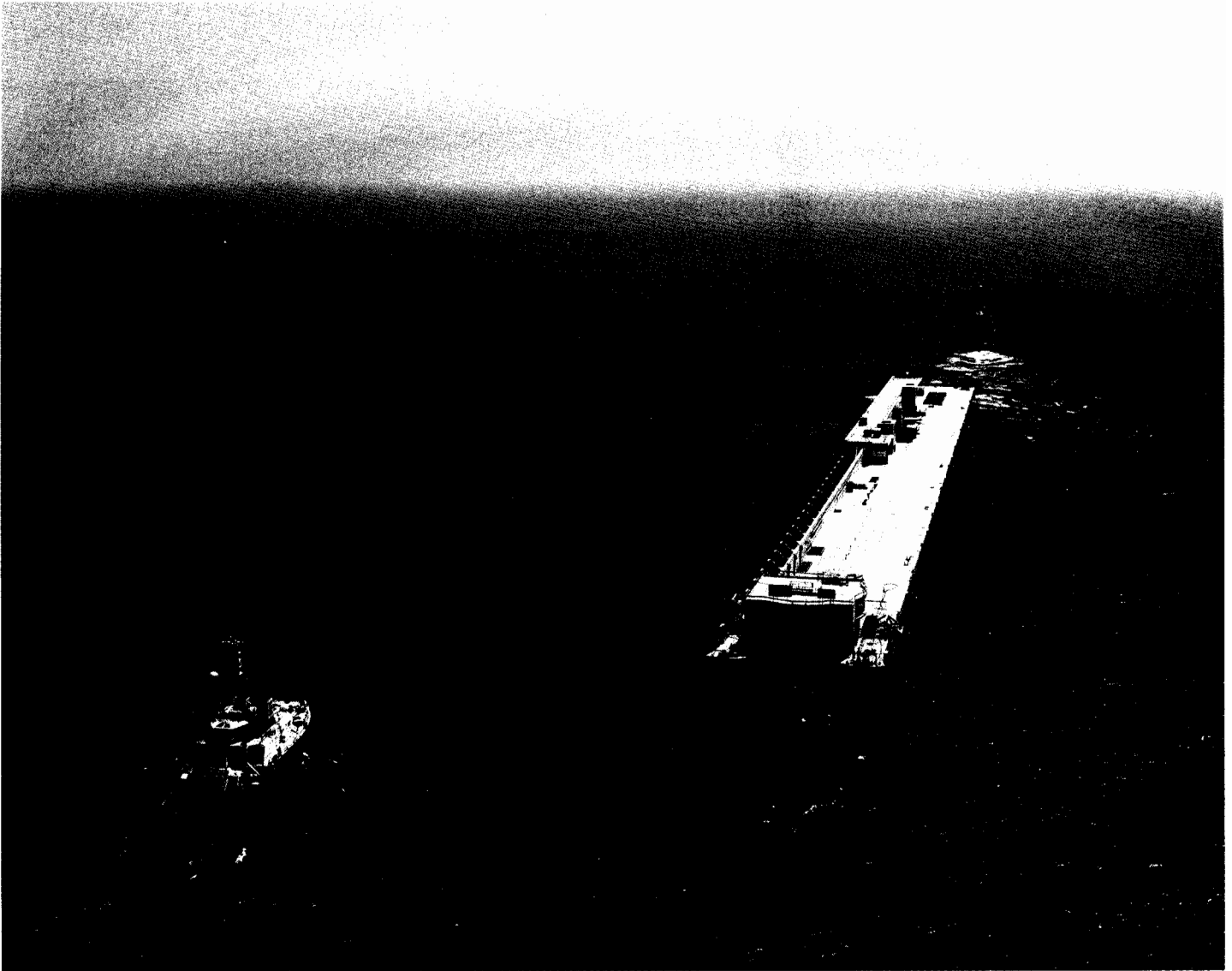
Instalación sobre el dique de la línea de remolque.

de 75 mm de diámetro y de 1.100 m de longitud, terminado en dos ramales que, pasando por unas guideras, estaban anclados con grilletes a dos orejetas situadas en la losa superior del dique. En la proa del dique se dispuso un sistema de remolque de emergencia, igual al principal y terminado en una boya. El remolcador estaba escoltado por un remolcador de apoyo de 48 m de eslora, 14.000 hp de potencia y 120 t de tiro para prever posibles emergencias durante el remolque. Durante dos de los días de la navegación el viento alcanzó ráfagas de 20 a 25 nudos y las olas llegaron a alturas de 2 m. El tiro del remolcador fue de 100 t.

Para garantizar la integridad estructural del dique en la fase de transporte y según se ha descrito en el apartado de instrumentación se dispuso un ordenador en el interior del dique que leía los sensores y vía radio se transmitía la lectura a otro ordenador situado en el remolcador auxiliar, donde se controlaban y revisaban los datos mediante un programa con niveles establecidos de aviso y de alarma según la magnitud de los esfuerzos y se elaboraban informes que se enviaban por Internet a tierra. Los circuitos importantes estaban duplicados para caso de avería y desde el remolcador auxiliar se podían corregir la mayoría de los posibles problemas. En caso de peligro estructural se hubieran tomado las medidas necesarias, modificando la ruta y fondeando el dique en alguno de los abrigos estudiados cercanos a ella.

9. OPERACIONES PREVIAS A LA INSTALACIÓN DEL DIQUE EN MÓNACO

Meses antes de la llegada del dique, desde un navío de 180 m de eslora, con una grúa a bordo de 2500 t de capacidad, se procedió primero a la hincada de los pilotes con martillo hidráulico y des-



Vista aérea del dique remolcado y del remolcador de apoyo.

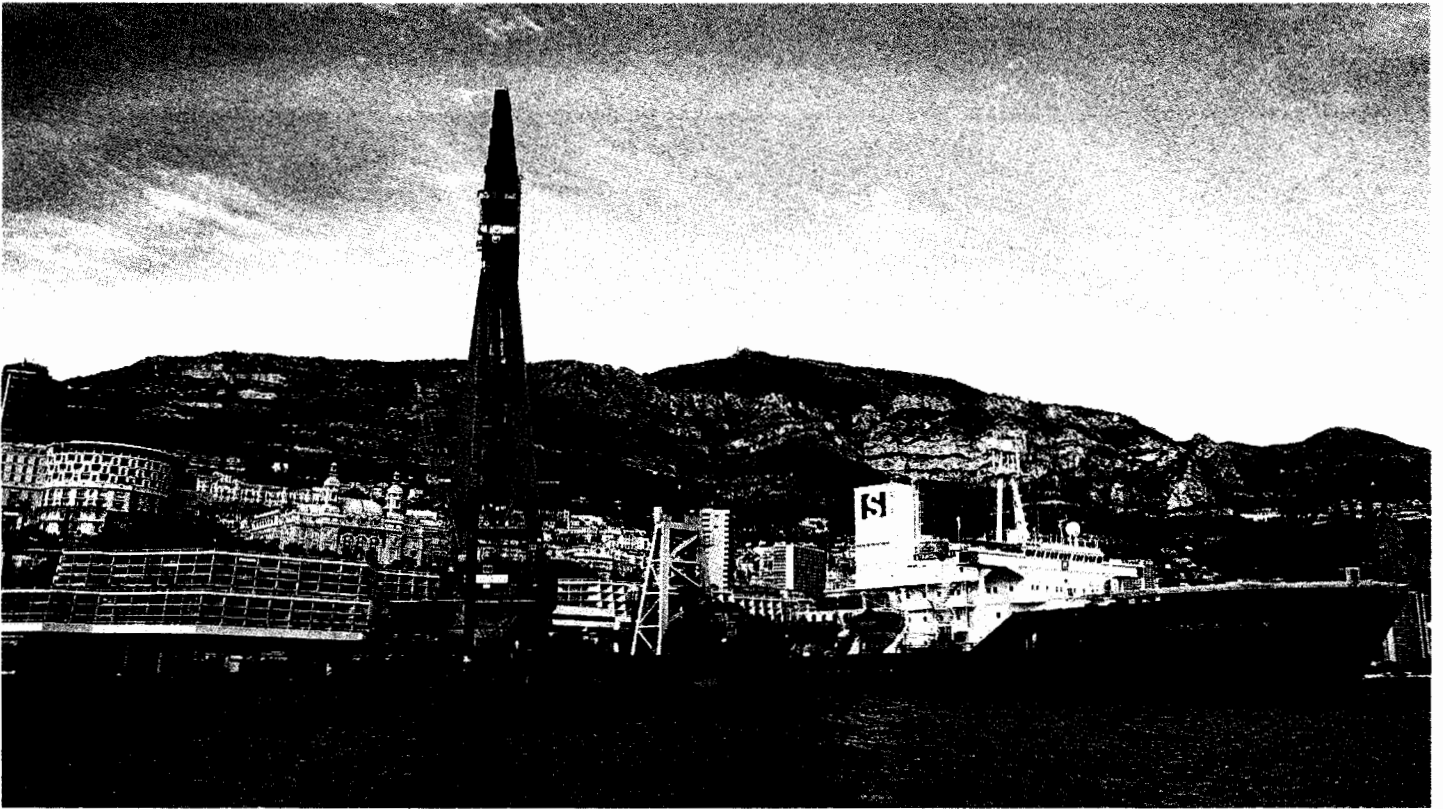
pués a la colocación de los más de 3 km de cadenas, muchas de ellas con un peso de más de 500 kg/m, que forman las 10 líneas de amarre.

Al llegar el dique a Mónaco se inició la operación de instalación y tensado provisional de las cadenas que sirven para su amarre permanente.

Una vez tensadas todas las cadenas en esta posición, con el dique a unos 10-15 m del estribo, se esperó a que las condiciones de oleaje y meteorológicas fueran favorables para la maniobra de conexión de la rótula. Para guiar y sujetar el dique

en esta operación, evitando desplazamientos de vaivén que la pudieran dañar, se diseñó un sistema de grandes vigas de acero, que se colocaron sobre el dique antes de la flotación en Algeciras.

Entre los dos macizos de hormigón se dispuso una gran viga metálica de 60 t de peso, apoyada en ellos mediante apoyos de neopreno. En cada extremo las vigas se prolongaban sobre los macizos para su anclaje. Así se controló el dique horizontalmente. Para aproximarlo hacia el estribo se instalaron sobre él dos cabrestantes con doble tambor, de 100 t de tiro cada tambor.



Hinca de pilotes en Mónaco desde el Stanislav Yudin.



Amarre del dique con las cadenas desde el remolcador de apoyo.



Detalle de los elementos utilizados para la instalación del dique.



Lastrado del dique en Mónaco antes de la instalación.

Por seguridad, para frenar al dique y limitar la aproximación al estribo y así evitar dañar la rótula en la maniobra de conexión, se instalaron horizontalmente cuatro puntales terminados en apoyos de neopreno en el lado de la pared del dique y en barras roscadas en el extremo opuesto.

Para evitar que el oleaje levantase el dique de los apoyos de las vigas laterales sobre los gatos verticales, se añadió en Mónaco un lastre de 12.000 m³ de agua dulce hasta un calado de 16,40 m en el lado de la rótula, para que se tuviera que levantar con los gatos más del movimiento vertical de oleaje previsto durante la maniobra de conexión.

La posición del dique y de la rótula se controlaron instalando sobre el estribo tres estaciones totales motorizadas y una estación GPS de referencia y sobre el dique dos de ellas, una en proa y otra en popa y un acelerómetro. En la rótula se instalaron dos punteros láser, con dianas en el cono de recepción, cuatro cámaras de video y dos sonares. Todo ello se controlaba desde una oficina situada sobre el estribo. Los datos de posición relativa entre rótula y cono se pasaban a un modelo de ordenador en tres dimensiones, en el que se podía controlar la posición relativa y el contacto entre ambas piezas.

10. INSTALACIÓN DEL DIQUE EN MÓNACO

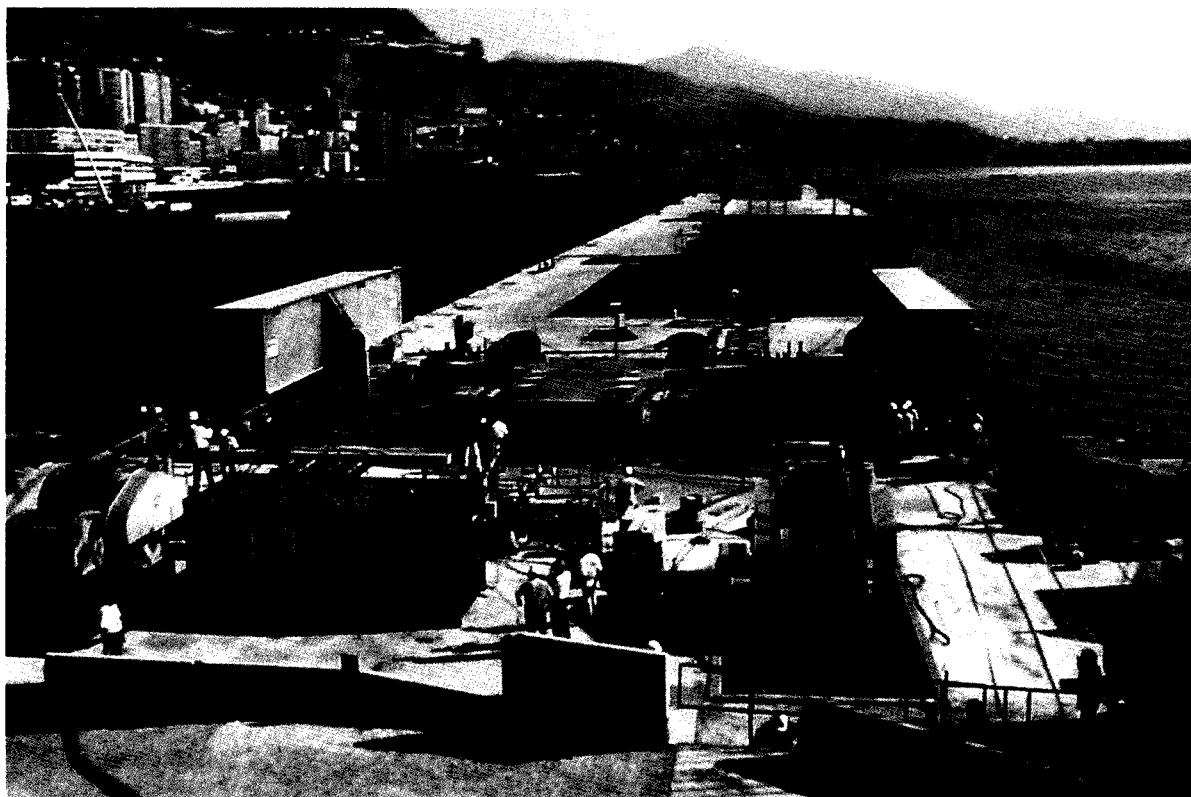
La primera fase de la instalación, la aproximación del dique para introducir la rótula en su alojamiento en el estribo, se inició de madrugada con mar calmado. El remolcador auxiliar que lo acompañó desde Algeciras tiraba de él para frenarlo o retirarlo en caso necesario y para controlar su alineación correcta frente a desplazamientos por el oleaje.

En pasos de 20 a 25 cm, se fue avanzando con la rótula parcialmente dentro, parando para comprobar y corregir después de cada paso. Se avanzaban las tuercas de las barras de freno la medida prevista y se dejaban los gatos y tuercas de seguridad con un recorrido de amortiguación.

La tolerancia admisible de posición de la rótula era un círculo de 4 cm de diámetro, pero se limitó por seguridad a un círculo de 2 cm de diámetro. La buena construcción de las vigas de guiado hizo que los errores estuvieran dentro de un círculo de 1 cm de diámetro. La rótula quedó en su posición final, con los cabrestantes sujetando provisionalmente al dique después de 9 h de maniobra.

Inmediatamente comenzó la segunda fase de la instalación abriendo la puerta de la primera cámara, vaciando la segunda y

Vista general del dique durante la maniobra de conexión.



abriéndola después de verificar la estanqueidad de la junta frontal entre piezas de dique y estribo. Después de una limpieza de la cámara, se quitó la instrumentación, se giró la brida loca enfrentando sus orificios con los del cono de la rótula, se colocaron las 40 barras roscadas de fijación definitiva y se tensaron al 60% de la tensión final. A continuación se descargaron los gatos horizontales y verticales y se soltaron poco a poco los cabrestantes. Posteriormente se les aplicó la tensión final a las barras de fijación.

11. CONCLUSIÓN

La ejecución de este dique semiflotante de abrigo, representa una solución muy innovadora, con escasos precedentes de realización a nivel mundial. Para su ejecución se emplearon más de 44.000 m³ de hormigón, 13.500 t de acero, 40.000 m² de encofrados, 40.000 planos, 150.000 horas de ingeniería, con el trabajo de más de 700 personas que desde el mes de Junio de 1999 han participado en la construcción e instalación de este enorme y complejo dique.

11.1. FUTURO DE ESTA TECNOLOGÍA

Es muy interesante destacar este aspecto en un mundo cada vez más interrelacionado. La cooperación entre los distintos países, aprovechando ventajas propias de cada lugar, posiciones geográficas más favorables, incluso aspectos culturales de las distintas sociedades permiten una serie de acciones en donde todos deben de contribuir para obtener los mejores resultados en nuevos proyectos, tanto en el ámbito de las infraestructuras como de la colaboración entre naciones.

Es precisamente, bajo este punto de vista, lo que hará posible en un futuro que cualquier avance tecnológico (bien sea en construcción, comunicaciones, medicina, etc), pueda ser compartido y aprovechado por todos.

En este caso se está hablando de una obra portuaria que conseguirá, con pequeñas variaciones en su concepción, las ampliaciones de puertos, desarrollo de instalaciones off-shore, incremento de zonas residenciales costeras, etc. Se abre un nuevo mundo de posibilidades con este nuevo sistema de aumento de los espacios ganados al mar. ■