

# FABRICACIÓN Y REMOLQUE DE LOS CAJONES DE HORMIGÓN PARA LA PROLONGACIÓN DEL MUELLE DE PONIENTE EN EL PUERTO DE PALMA DE MALLORCA

Fidel Sáenz de Ormijana Valdés.

Antonio Luengo Linares.

Eduardo Prieto García.

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

FERROVIAL

## RESUMEN

*La prolongación del Muelle de Poniente en el Puerto de Palma de Mallorca comprende la fabricación de siete cajones flotantes de hormigón. Los cajones fueron fabricados en Cartagena y remolcados hasta Palma de Mallorca, lo que suponía un recorrido de 250 millas que debía realizarse durante el invierno e inicio de la primavera. Durante el remolque, el cajón nº 2 resistió vientos de fuerza 6 y olas de 3,5 a 4,5 m, antes de hundirse a 11 millas del puerto de destino. El remolque de los restantes cajones se produjo sin problemas. El artículo describe la fabricación y, especialmente, el remolque de los cajones, las incidencias habidas y la experiencia ganada durante el mismo.*

## ABSTRACT

*The prolongation of the west jetty of the Port of Palma de Mallorca called for the manufacture of seven floating concrete. These were cast in Cartagena and had to be towed the 250 miles to Palma de Mallorca during the months of winter and early spring. During the crossing, caissons no 2. withstood force 6 gales and waves of between 3.5 and 4.5 m before sinking 11 miles from the port of destination. None of the other caissons suffered any mishap. This article describes the manufacture and transport of this material, the difficulties encountered, and the experience acquired in the course of the operation.*

Se admiten  
comentarios a este  
artículo, que deberán  
ser remitidos a la  
Redacción de la ROP  
antes del 30 de  
noviembre de 1996.

Recibido en ROP:  
julio de 1996

NOTA: Justo Aguado Corruçhaga. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Director de las Obras: Autoridad Portuaria de Baleares.

## INTRODUCCIÓN

La Prolongación del Muelle de Poniente del Puerto de Palma de Mallorca tiene por objeto aumentar la longitud de atraque para buques de crucero turístico y trasatlánticos. La obra consiste en la prolongación en sentido longitudinal del actual muelle, formando un recinto de dimensiones 115 x 30 m<sup>2</sup>, construido a base de cajones flotantes de hormigón, según muestra la Fig. 1.

La mayor parte de la obra se ubica entre las batimetrías -17 y -18, a excepción del arranque próximo al muelle actual, donde los calados son más reducidos. Los cajones, cuyas características principales se muestran en la Tabla 1 y en la Fig. 2, van cimentados sobre una banqueta de escolera a la cota -12.

La obra fue adjudicada a una de las soluciones variantes ofertadas por Ferrovial S. A. en agosto de 1995, siendo redactado el proyecto de construcción de las obras por la Oficina Técnica de Obra Civil de Ferrovial.

Tabla 1. Características principales de los cajones

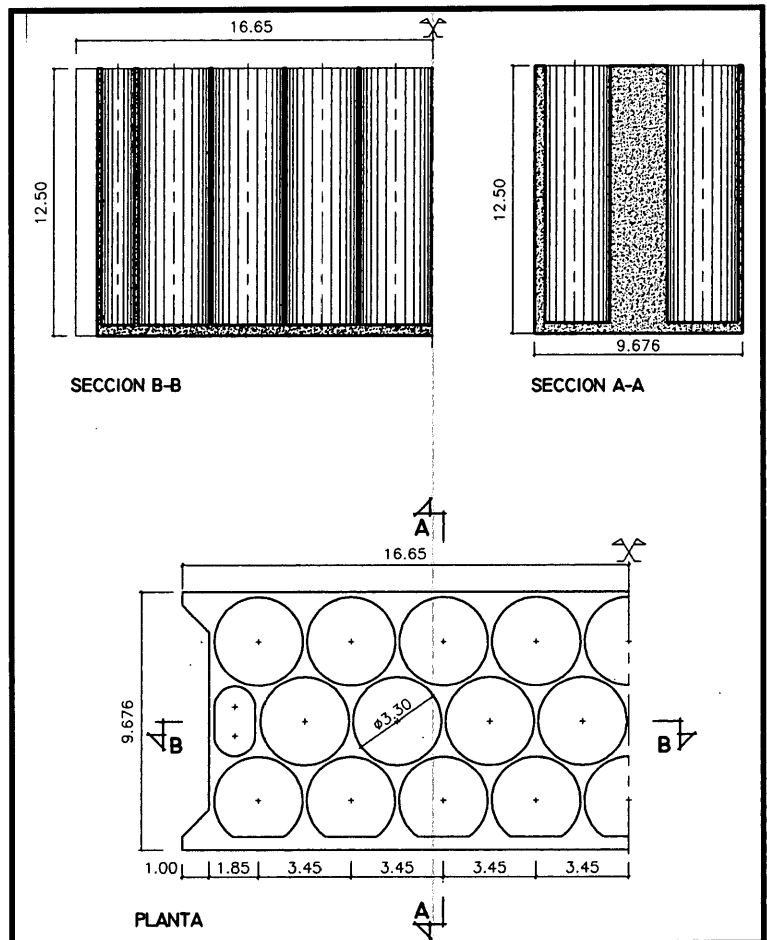
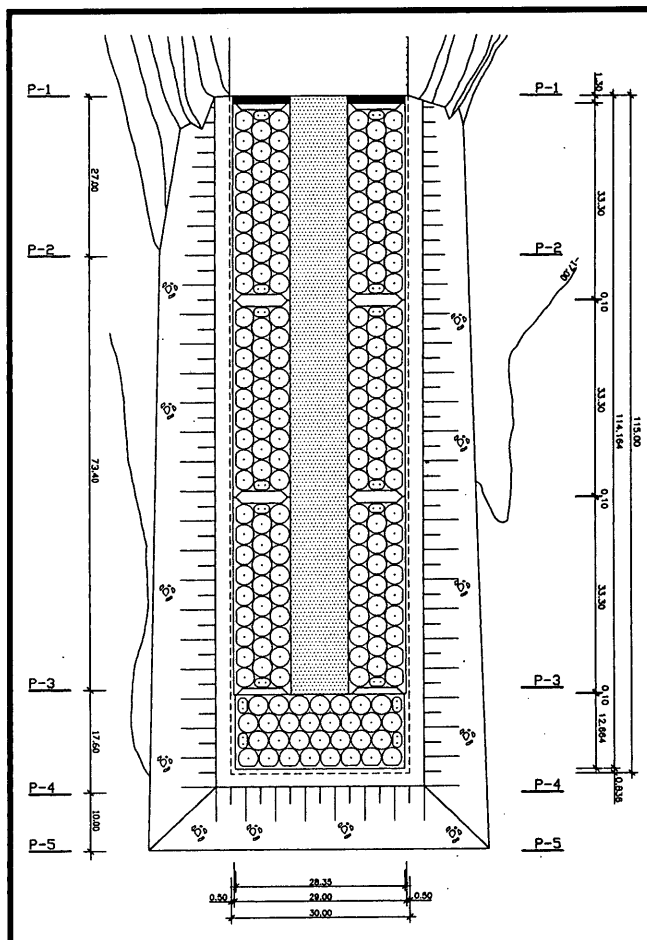
Celdas	diámetro (m)	Alineaciones principales	Testero
	número de filas	3,30	3,30
		3	4
	Eslora (m)	33,30	28,50
	Manga (m)	12,664	12,664
	Puntal (m)	12,50	12,50
	Peso (T)	2.760	3.135

## FABRICACIÓN DE LOS CAJONES

### INSTALACIONES

Para la fabricación de los cajones, Ferrovial dispone de unas instalaciones cuyos elementos principales son una pontona sumergible dividida en catorce tanques, que se lastran según progresa

Figura 1. Planta general de las obras.  
A la derecha, figura 2. Cajones. Formas.



la construcción del cajón abriendo unas válvulas accionadas neumáticamente, y un encofrado deslizante apoyado en 24 barras de trepa con gatos de 22 T.

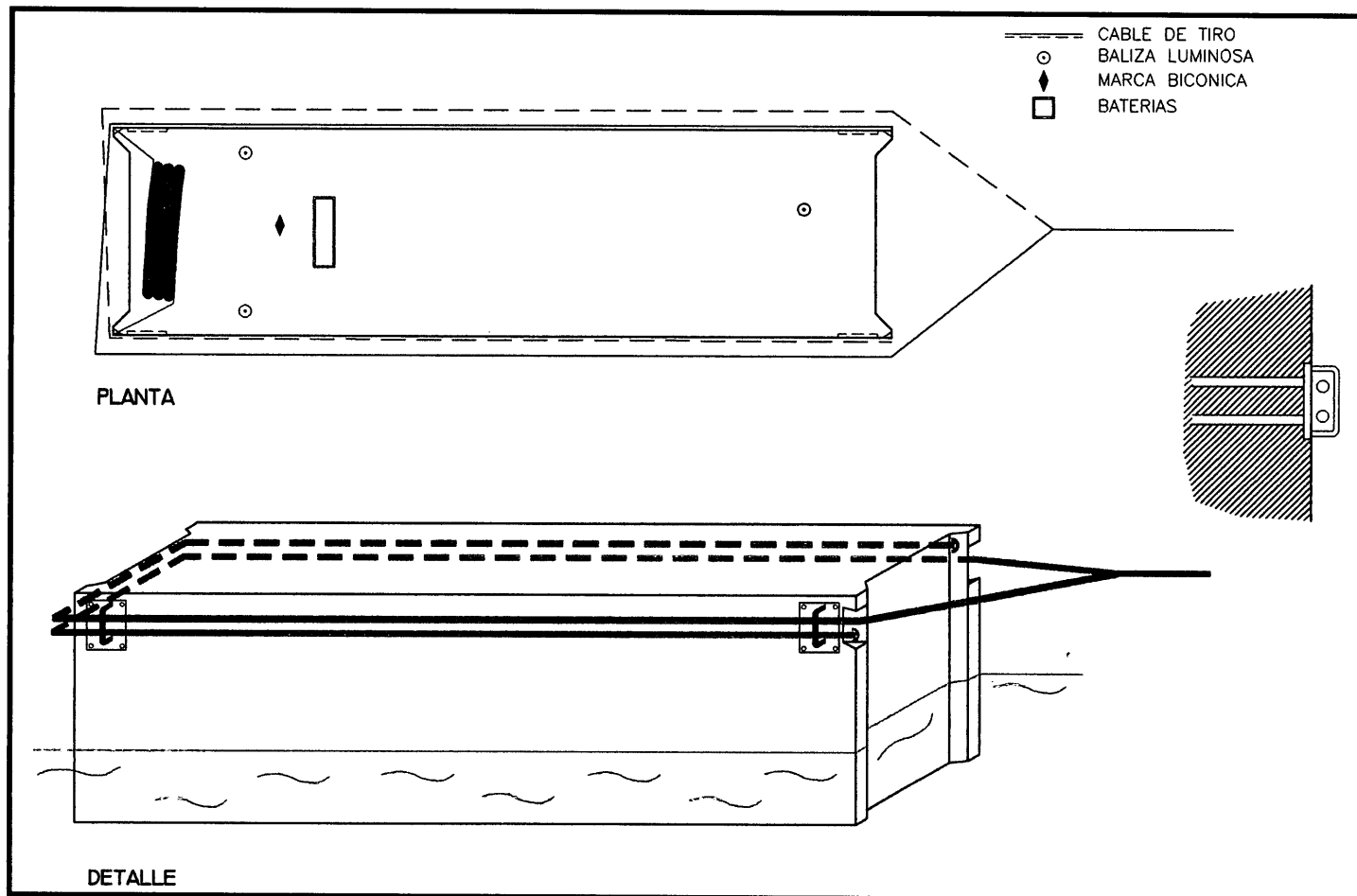
En el momento de adjudicación de las obras, estas instalaciones estaban ubicadas en el Puerto de Cartagena, donde se terminaba la fabricación de 17 cajones para la construcción de la nueva alineación del Muelle Santa Lucía, en el citado puerto. La posterior adjudicación de las obras correspondientes al nuevo Atraque Terminal de Vehículos en el Puerto de Tarragona, planteaba problemas de plazo en caso de trasladar las instalaciones al Puerto de Palma, como estaba previsto. Por ello, Ferrovial, previa la aprobación de las Autoridades Portuarias de Cartagena y Baleares, optó por fabricar los cajones de la Prolongación del Muelle de Poniente en Cartagena, para su posterior remolque a Palma de Mallorca. De esta manera era posible iniciar inmediatamente la fabricación de los cajones del Puerto de Palma, para trasladar posteriormente las instalaciones directa-

**Tabla 2.**  
**Hormigón de los cajones. Dosificación**

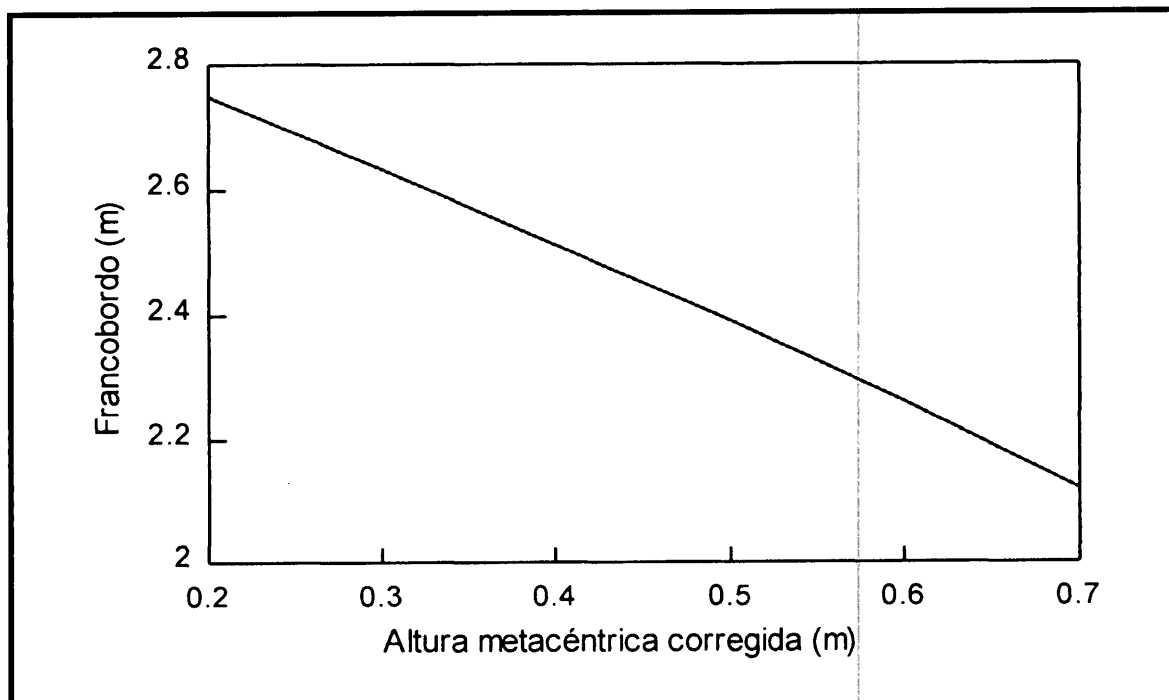
		Kg/m³
Cemento I-45 SR/MR		300
Arena		1.100
Árido grueso	6 - 12 mm	75
	12 - 15 mm	860
Agua		185
Aditivo		1

mente a Tarragona, eliminando el paso intermedio por Palma de Mallorca que suponía como mínimo un mes de retraso en la programación. A cambio de ello, era preciso afrontar el remolque de los cajones desde Cartagena a Palma de Mallorca, a lo largo de 250 millas aproximadamente y precisamente en los meses de invierno, pues se inició el remolque de los cajones el 14 de diciembre de 1995.

**Figura 3. Aparejo de remolque.**



**Figura 4. Variación relativa de la altura metacéntrica corregida y del francobordo medio al variar la altura de lastre con agua por igual en todas las celdas para mejorar la estabilidad (este lastre se añade al lastre con hormigón de la fila de celdas del lado tierra del cajón que tiene por objeto compensar la asimetría del mismo).**

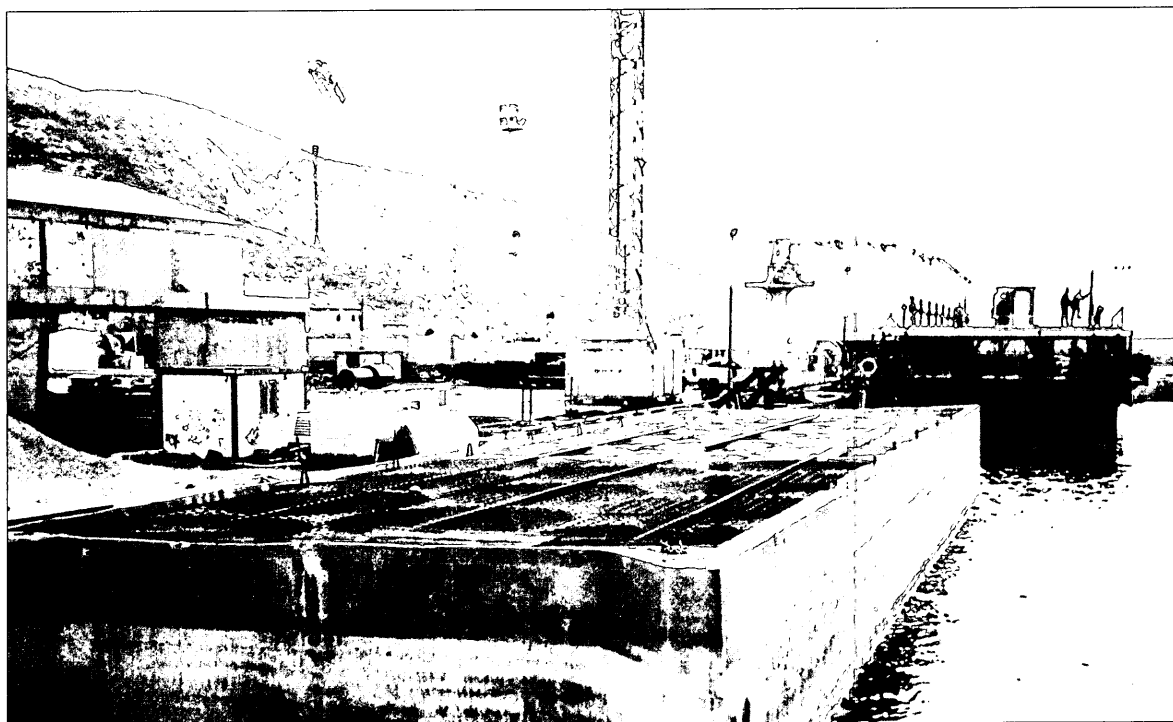


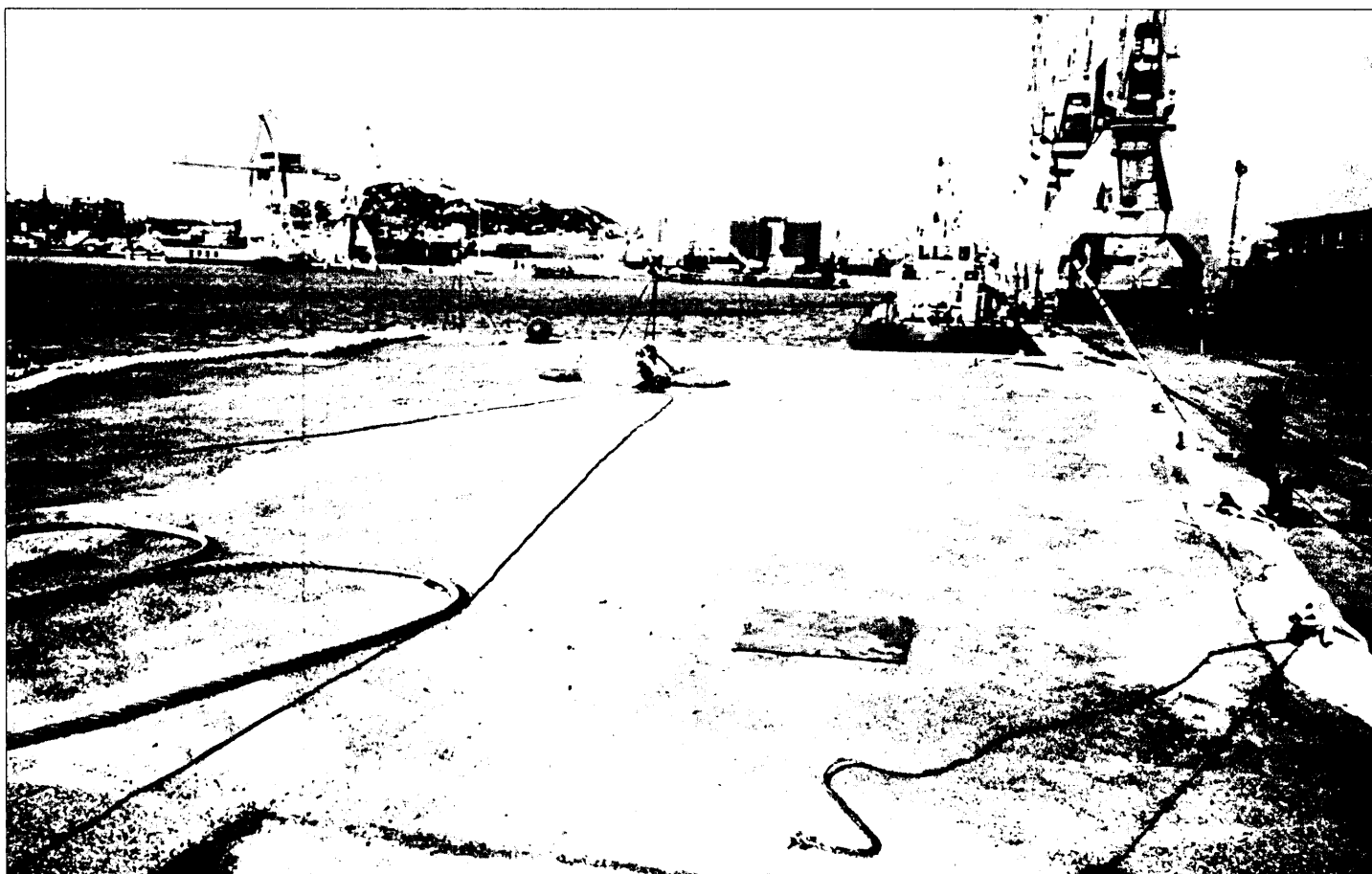
## HORMIGÓN

La dosificación adoptada para el hormigón de los cajones se muestra en la Tabla 2. En general la dosificación de cemento no puede reducirse, no solamente para garantizar la durabilidad del hor-

migón y su colaboración en la protección de las armaduras en el agresivo ambiente marino, sino también por condicionantes constructivos debidos a la rapidez del deslizado y la colocación del hormigón por bomba. Por todo ello la resistencia característica real alcanzada a 28 días excedió de

**Foto 1. Cajón siendo preparado para empezar a hormigonar la losa de cubrición. Al fondo se aprecia el hormigonado de un nuevo cajón; se distingue el encofrado deslizante y el mástil de reparto del hormigón en el muelle.**





325 Kg/cm<sup>2</sup>, si bien por condicionantes puramente estructurales es suficiente para los cajones un hormigón de mucha menor resistencia. La densidad media medida en probeta estuvo en torno a 2.36 T/m<sup>3</sup>.

## RENDIMIENTO

El rendimiento obtenido fue de un cajón por semana. El mismo día que se realizaba la botadura de un cajón, se reflotaba la pontona, se limpiaba, se preparaba la ferralla y a continuación se hormigonaba la zapata del nuevo cajón. El rendimiento conseguido en el deslizado fue de 3.8 m en 24 horas aproximadamente.

## TRANSPORTE

### APAREJO DE REMOLQUE

Existen muy diversas maneras de remolcar los cajones. El aparejo adoptado en este caso se muestra en la Fig. 3. Del remolcador partía una es-

tacha de polipropileno  $\varnothing$  105 mm de 200 m de longitud, con carga de rotura 110 T. Esta estacha terminaba en un pie de gallo formado por dos cables  $\varnothing$  40 mm de 100 m de longitud, cada uno de los cuales abrazaba el cajón por la popa terminando amarrado a un punto fuerte en la proa del cajón.

Para evitar el desplazamiento vertical de los cables a pesar de los movimientos del cajón durante el remolque, en las esquinas del mismo se dispusieron unas chapas metálicas con cáncamos por donde se hacía pasar el cable, tanto a proa como a popa. La función de los cáncamos de proa es más importante y debe comprobarse su resistencia pues pueden soportar esfuerzos importantes como consecuencia de los movimientos del cajón. Además de su protección con chapa de acero, las tensiones de contacto en las esquinas se limitaban achaflanando las aristas en la zona de paso del cable.

### ESTABILIDAD NAVAL DEL CAJÓN

Se llama estabilidad a la capacidad de un objeto flotante de volver a su situación de equilibrio

**Foto 2. Cajón con la losa de cubrición ya hormigonada. Se aprecia en primer plano uno de los cuatro registros para achique en caso de emergencia, que se suprimieron poseriormente. Sobre cubierta se distinguen los tripodes de las marcas luminosas y baliza, así como la caja de baterías. Al fondo puede observarse el remolcador.**



cuando cesa la acción (oleaje, viento, etc.) que le desvió de esta posición de equilibrio. La estabilidad se mide por medio de la altura metacéntrica corregida (AMC) ya que el par adrizante es proporcional a ésta. Para cajones flotantes, es normal exigir entre 0.3 y 0.6 m. A mayor altura metacéntrica corregida, la estabilidad es mayor pero al mismo tiempo el par adrizante y por tanto la reacción de retorno a la posición de equilibrio es más violenta. Por ejemplo, para valores superiores a 1.3 m, las reacciones de una nave son muy bruscas haciendo incómoda y difícil la navegación con mar gruesa.

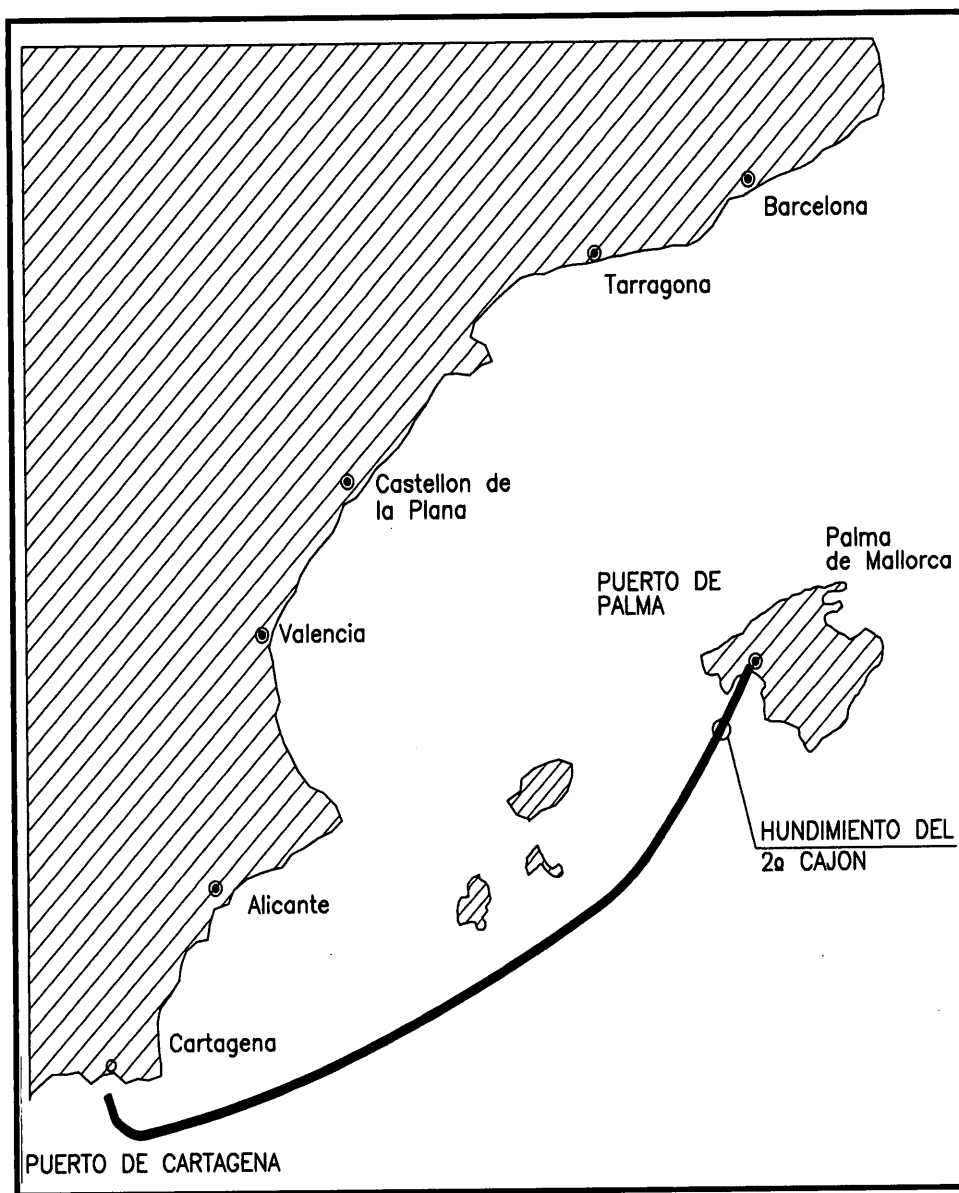
Los cajones de estas dimensiones rara vez son estables transversalmente en vacío. Es necesario, por tanto, lastrarlos para conseguir hacer bajar el centro de gravedad, lo que al mismo tiempo reduce el francobordo. Se adoptó un primer lastrado parcial con hormigón pobre (85 cm en la fila próxima a la pared exterior de 20 cm de espesor) para corregir la asimetría de los cajones. Posteriormente se estudiaron diversas posibilidades de lastre para mejorar la estabilidad.

Por ejemplo, la Fig. 4 muestra la relación entre altura metacéntrica corregida y francobordo al lastrar con agua todas las celdas por igual. Finalmente se decidió lastrar la fila central de celdas de los cajones con 40 cm de hormigón pobre mas 75 cm de agua, además del lastre para corrección de asimetría, para conseguir una altura metacéntrica corregida (AMC) de 35 cm aproximadamente.

#### CUBRICIÓN DE LOS CAJONES

Cuando la distancia a remolcar es corta, suele ser suficiente con cubrir el cajón con una lona fijada a unos cáncamos exteriores en el fuste del cajón. Para un remolque de 250 millas en alta mar esta solución no parecía suficientemente segura, así que se optó por cubrir los cajones con una losa de hormigón armado de 15 cm de espesor, anclada al fuste del cajón y diseñada para resistir una presión de 2 T/m<sup>2</sup>. Para la construcción de la losa se colocaban unos perfiles metálicos en los diámetros medios de la celdas sobre los cuales se

**Foto 3. Cajón nº 2 alejándose de Cartagena el primer día de navegación (14 de enero).**



**Figura 5. Travesía de los cajones y punto de hundimiento del segundo cajón.**

apoyaba un encofrado perdido. Posteriormente, una vez que el cajón arribaba a Palma de Mallorca, era preciso demoler la losa previamente al fondeo del cajón.

#### MEDIDAS DE SEGURIDAD

En el cajón se instaló un aparejo para remolque de fortuna, así como las luces con alimentación por baterías, señales diurnas y marcas previstas en la legislación vigente.

Como suele ser común en este tipo de operación, se comunicaron las celdas exteriores en grupos de cuatro, dejando por grupo una tapa registro en la losa para poder introducir una bomba de

achique de agua en caso necesario. La comunicación de celdas facilita el posterior fondeo del cajón. Sin embargo, esta disposición no parece la más conveniente para distancias importantes en alta mar, a tenor de la experiencia habida, y se cambió posteriormente como se describe más adelante.

Por último, ya que no es posible eliminar el riesgo completamente, se contrató un seguro adecuado para cubrir la posible pérdida del cajón así como la Responsabilidad Civil frente a posibles daños a terceros.

#### INCIDENCIAS Y EXPERIENCIAS

El transporte de los cajones comenzó el 14 de diciembre de 1995. Antes de iniciar la travesía se recababa toda la información meteorológica disponible. El remolque se efectuaba con un remolcador de potencia 2030 BHP. El primer cajón arribó a Palma de Mallorca tras cuatro días de travesía con mar en calma y un tiempo excelente, sin que ni siquiera llegara a mojar la cubierta.

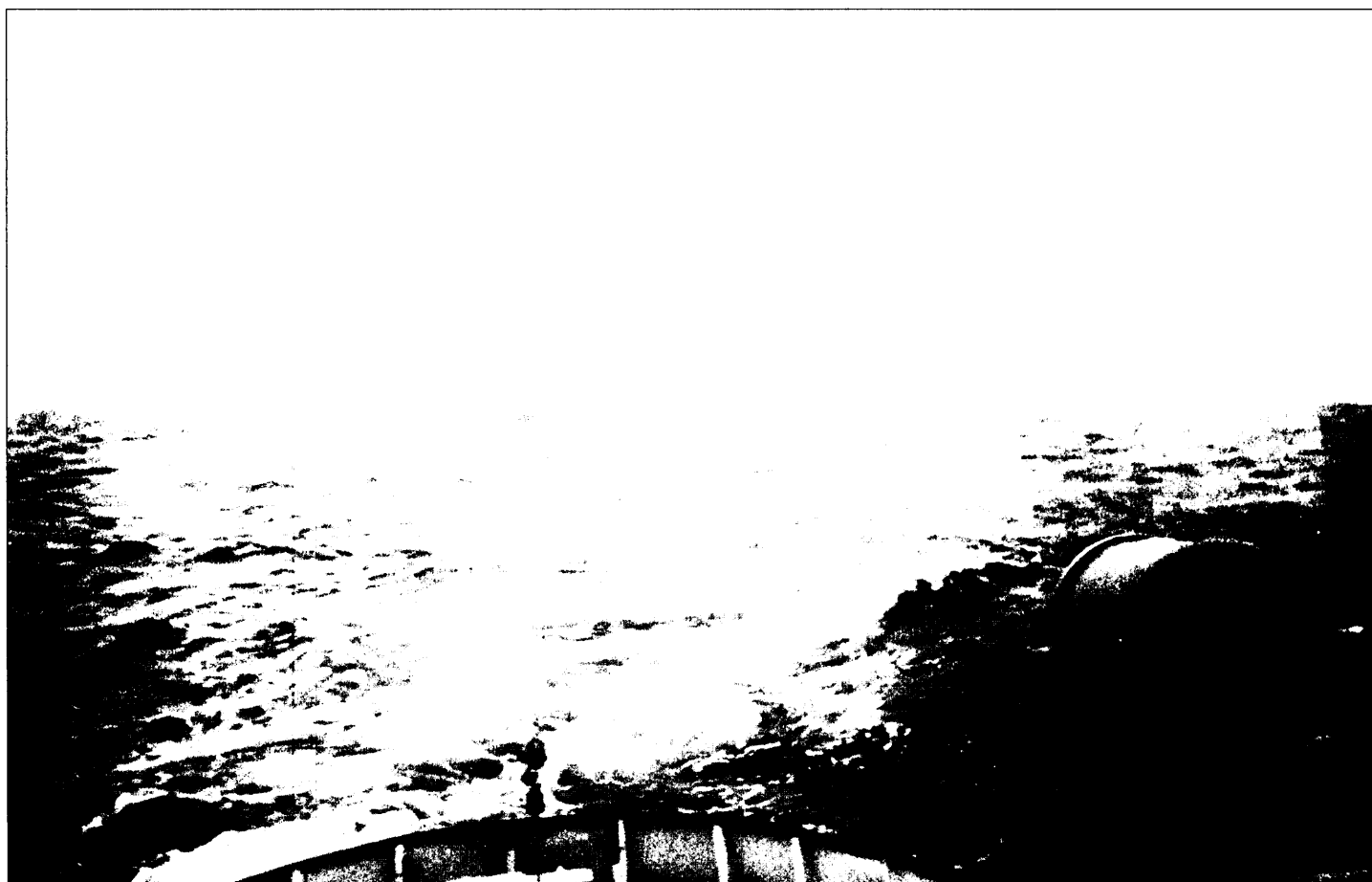
El segundo cajón salió de Cartagena el 14 de enero de 1996 con buen tiempo. Al día siguiente el tiempo seguía siendo bueno, pero comenzaban a soplar vientos frescos de levante. El día 15 empezó a empeorar el mar, apareciendo olas de 1,5 a 2,0 metros y vientos del Este hasta fuerza 5. El día 17 la velocidad del viento había aumentado hasta fuerza 6 con olas de 3,5 a 4,5 m, descendiendo la velocidad del remolcador a

2 nudos.

Desde el remolcador era posible observar en el cajón un balanceo importante, que alcanzaba hasta 15-20°. Aunque no es fácil conocer la magnitud exacta de la alzada y cabeceo, una estimación conservadora la situaría por encima de 3 m. Como resultado de ello, tal como muestran las fotos, el cajón llegaba a sumergirse completamente. Finalmente, a 11 millas del Puerto de Palma (ver Fig. 5), el cajón terminó por hundirse, tocando fondo a -100 m aproximadamente. Aunque la causa estuvo de manera general en las pésimas condiciones meteorológicas, el mecanismo preciso de fallo por el que se hundió el cajón no se ha podido conocer con exactitud.



**Foto 4. Alzada de cajón n° 2 navegando el tercer día (17 de enero); totalmente sumergido momentáneamente.**

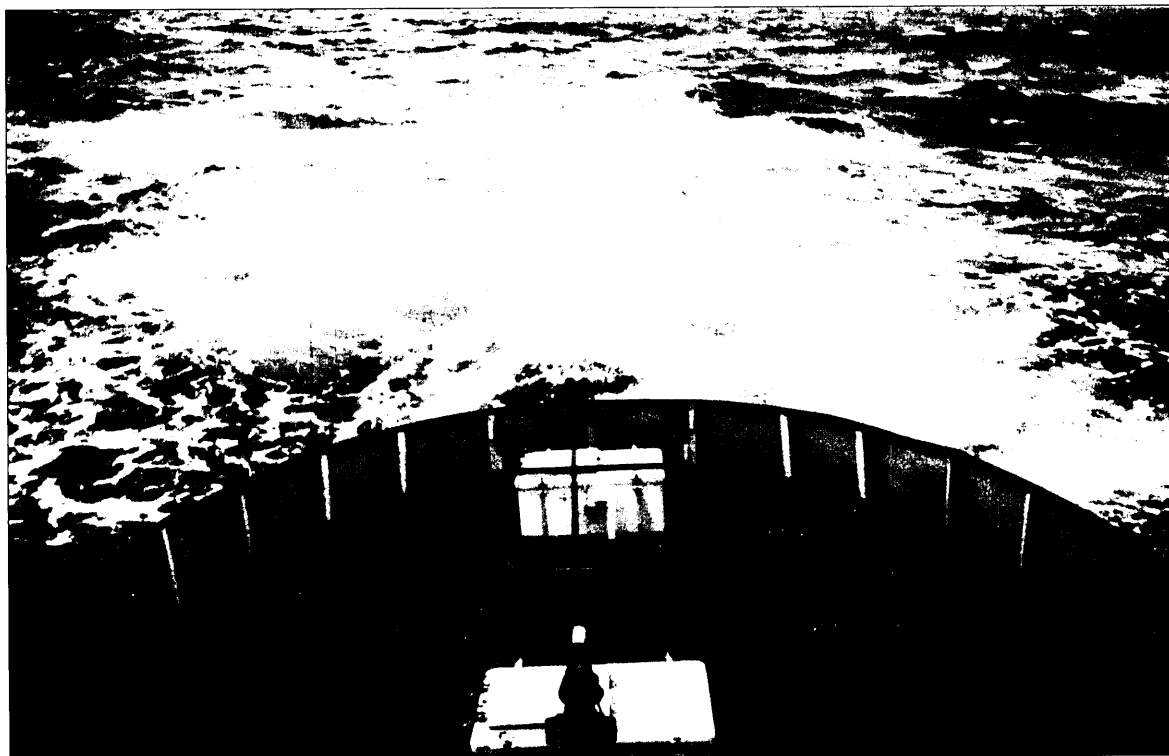


**Foto 5. Cajón n° 2 navegando el tercer día (17 de enero), emergiendo.**





**Foto 6. Balanceo  
del cajón nº 2,  
navegando el tercer  
día (17 de enero).**



**Foto 7. Cajón nº 2,  
recién hundido al  
tercer día de  
navegación (17 de  
enero) a 11 millas  
del puerto de Palma  
de Mallorca.**

## CONCLUSIONES

A raíz del accidente se analizaron las disposiciones adoptadas para el remolque, que se hallaron esencialmente correctas, haciendo frente la Compañía de Seguros a la indemnización por la pérdida del cajón. Como medida de seguridad se decidió soldar los registros en la losa de cubrición e independizar las celdas para el transporte. Esta solución se juzgó más conveniente ya que, comprobada en general la estanqueidad del cajón, aún cuando se produjeran filtraciones localizadas en una celda, el volumen de agua que el cajón puede embarcar estaría limitado al volumen de la celda afectada y sólo produciría una pequeña reducción del francobordo. En el caso de celdas comunicadas por cuadrantes, el volumen de agua que el cajón puede embarcar es muy superior pues corresponde al total del grupo de celdas del cuadrante; el par correspondiente produciría escoras muy grandes y agotaría sobradamente el

francobordo. Por otro lado, en las condiciones de mar producidas durante el hundimiento del cajón, el achique en alta mar hubiera presentado serias dificultades. Por último, se decidió aumentar la longitud de la estacha de remolque al doble (400 m) para amortiguar el tiro del remolcador. Igualmente se previó tomar la Isla de Ibiza como posible escala en caso de mal tiempo, posibilidad que no llegó a ser necesaria.

Por problemas de mal tiempo, se reinició el transporte de los cajones un mes más tarde, realizándose sin problemas con los seis cajones restantes, exceptuando un pequeño incidente con el último cajón. Éste, a las tres horas de su salida de Cartagena el 14 de abril, se encontró con mar de fondo que hacía que agotara el francobordo, por lo que se decidió volver a Cartagena. El 15 de mayo se efectuó la salida definitiva, arribando el último cajón al Puerto de Palma de Mallorca el 19 de mayo. ●

# MTM

## MONTAJES Y TRANSPORTES MARITIMOS S.L.

Nuestra principal misión es apoyar en la realización de obras marítimas a las principales empresas de construcción, así como la ejecución directa del citado tipo de obras.

<i>Vertido de escolleras</i>	:	<i>Construcción de muelles</i>
<i>Dragados</i>	:	<i>Enrases</i>
<i>Hormigones sumergidos</i>	:	<i>Fondeo de cajones</i>
<i>Emisarios</i>	:	<i>Achiques</i>
<i>Puertos deportivos</i>	:	<i>Tomas de agua</i>
<i>Pantalanes</i>	:	<i>....y todo tipo de obra marina</i>

POLIGONO INDUSTRIAL RIU CLAR-PARCELA 186 A  
43006- TARRAGONA  
Teléfono/Fax: 977-54 85 53  
Correspondencia: Apartado de Correos 1.134 TARRAGONA