

Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias

Eloy Pita Olalla

Ing.de Caminos

Ingeniería Creativa Pita, S.L.

Director General

epita@in crea.eu

Juan Ignacio Grau Albert

Ing. de Caminos

Puertos del Estado

Subdirector de Infraestructuras

Jignacio.grau@puertos.es

Alejandro Pérez Caldentey

Dr. Ing. de Caminos

Grupo de Hormigón Estructural

Profesor Titular de Universidad

apc@he-upm.com

RESUMEN

En este texto, se describe la técnica de construcción de cajones portuarios (campo en que la tecnología española es vanguardista) y el nuevo "Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias" de reciente publicación.

PALABRAS CLAVE: Manual, cajones flotantes, obras portuarias, hormigón, muelles, diques, puertos.

1. Objeto

La finalidad perseguida por esta ponencia es describir la técnica de proyecto y construcción de cajones, así como el contenido del mencionado Manual.

Entre otros aspectos, se destaca la comprobación del esfuerzo cortante para la cual se han introducido reglas innovadoras basadas en el estudio de las bases de datos experimentales existente y en el desarrollo de un plan específico de ensayos, representativo de las condiciones que se dan en los Cajones Portuarios. Estos estudios fueron financiados por Puertos del Estado.

2. Introducción

Dentro de la técnica del hormigón estructural, el campo de los cajones para diques, muelles y otras obras portuarias tiene un gran desarrollo en nuestro país. Podemos afirmar que se trata, con mucho, de las mayores piezas prefabricadas de hormigón en España, puesto que se han alcanzado, en un solo cajón, más de 10.000 m³ de hormigón. Estas *moles*, que alcanzan dimensiones de hasta 70×32×34 m, son trasladadas, por flotación desde su lugar de construcción hasta su destino, que puede estar alejado muchas millas.

Sin embargo, a pesar del gran desarrollo alcanzado por este sistema constructivo, no existía un procedimiento de diseño y ejecución establecido de forma específica, por lo que Puertos del Estado acordó redactar el *Manual para el Diseño y la Ejecución de Cajones de Hormigón Armado*. Este Manual se redactó a partir de un convenio específico firmado entre Puertos del Estado y el Grupo de Investigación de Hormigón Estructural de la Universidad Politécnica de Madrid (a través de la Fundación Agustín de Betancourt). El equipo formado por Juan Ignacio Grau y el Grupo de Investigación de Hormigón Estructural (Hugo Corres, Alejandro Pérez y Patricio Padilla) se encargó de redactar la versión

inicial del Manual que posteriormente fue sometida a los comentarios, modificaciones y aportaciones de un Grupo de Expertos en este campo de la ingeniería (entre los que se encontraba el primer autor de esta ponencia).

La redacción del Manual se ha desarrollado a partir del análisis de la documentación bibliográfica existente sobre temas relacionados con el diseño y construcción de cajones y de la experiencia aportada por los miembros del Grupo de Trabajo.

La finalidad perseguida es ofrecer a los usuarios, de una forma sencilla, precisa y práctica, todos aquellos criterios necesarios para el diseño, construcción y mantenimiento de cajones de hormigón armado, para lo que se ha realizado una aplicación específica de la EHE a este tipo de obras, tomando asimismo en consideración las recomendaciones del programa ROM.

En particular, el Manual analiza los tipos estructurales y dimensiones de los cajones flotantes, indica los requisitos esenciales y bases de cálculo para proyectar dichos cajones, así como los materiales a emplear.

Se dedican asimismo capítulos separados para la durabilidad de estas estructuras, sus aspectos constructivos y su control y mantenimiento.

Aunque los criterios generales expuestos son de aplicación a cualquier tipología de cajones, en el Manual se han particularizado de forma específica criterios para el diseño de cajones con aligeramientos cuadrados o circulares, que son los más usuales en la práctica habitual. Para este tipo de cajones también se han desarrollado procedimientos de análisis estructural, que contribuyen a entender su comportamiento, así como métodos para el armado de secciones cuya aplicación es directa y puede realizarse de forma manual, al objeto de realizar tanteos y optimizar secciones. No obstante, para el cálculo definitivo de armaduras, deben utilizarse procedimientos más precisos mediante la aplicación de programas específicos de ordenador para cálculo de estructuras.

3. Experiencia de la construcción de cajones, existente en España

La técnica de proyecto y construcción de estos cajones está fuertemente implantada en España y, de hecho, se viene aplicando con éxito tanto en la construcción de obras de atraque como en diques verticales.

Las primeras obras de cajones que se construyeron en España fueron el muelle de Levante del puerto de Huelva, en la ría del Odiel, que entró en servicio en 1932 con 8 metros de calado máximo; y el dique-muelle del Sagrado Corazón en Tarifa, que entró en servicio en 1945 con 10 m de calado máximo. En las décadas posteriores se extendió la técnica de fabricación de cajones a numerosas obras de atraque en los puertos de Pasajes, Avilés, Gijón, Cádiz, Cartagena...

En los años 80 se generalizó la construcción de obras de atraque de cajones aprovechando el crecimiento de los puertos comerciales del Estado para adaptarse a los nuevos tráficos, con necesidad de calados mayores que rentabilizaron el empleo de esta tipología estructural. Finalmente, su uso se extendió durante la década de los 90 a la construcción de diques verticales, llegándose en los últimos años a los 26 m de calado en los cajones del dique Reina Sofía de Las Palmas ó a los 28 m de calado en el dique de la dársena de Escombreras, en Cartagena, lo que sitúa a nuestro país entre los más avanzados –de hecho, sólo equiparable a Japón– en la construcción de cajones de hormigón armado.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de cajón de celdas cuadradas.

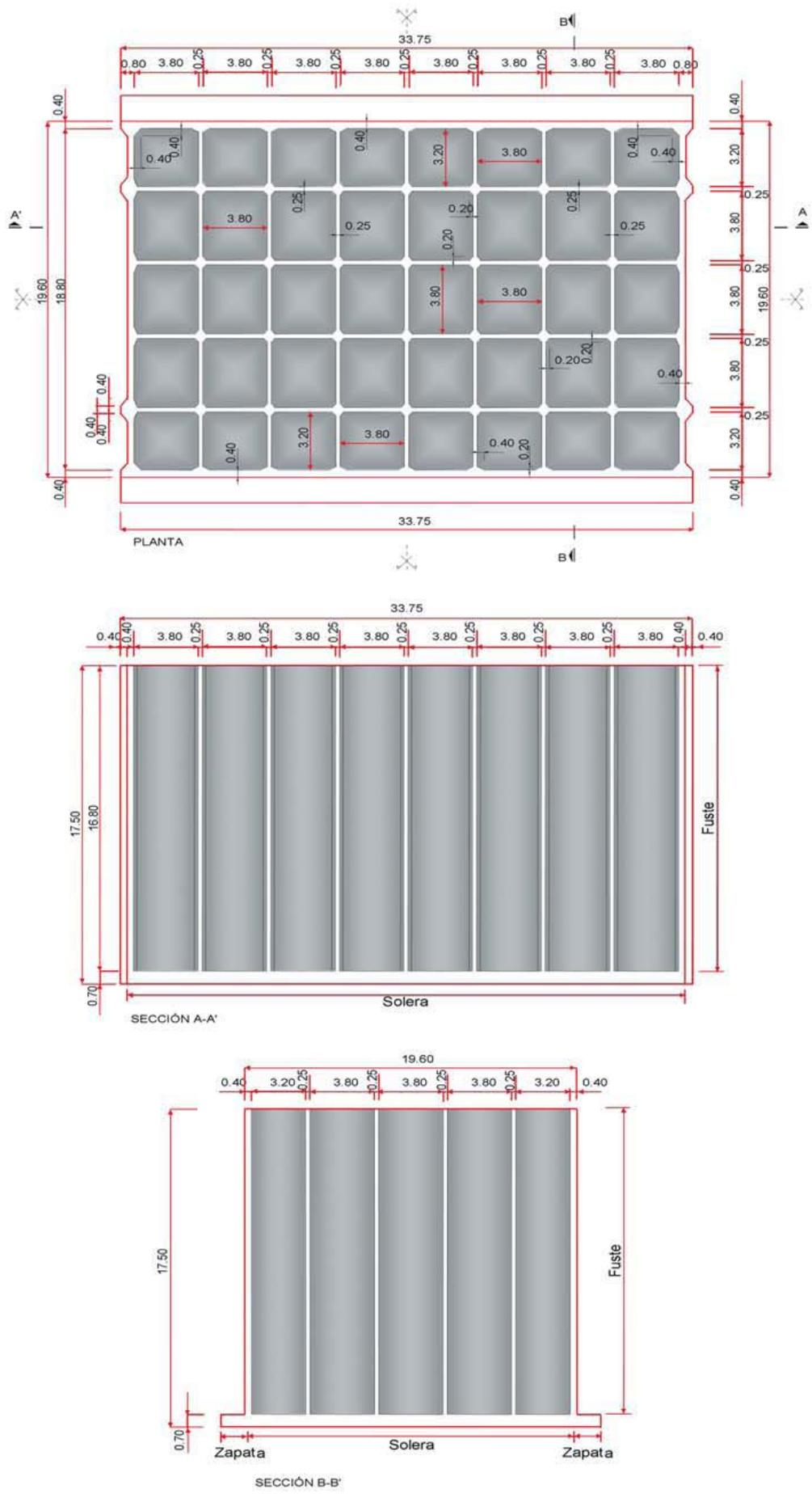


Fig.1 Geometría típica de un cajón flotante

4. El método constructivo

La construcción de los cajones puede realizarse en instalaciones flotantes y terrestres.

Lo habitual es que se construyan en instalaciones flotantes (denominadas, habitualmente, *cajoneros*) tales como:

- Dique flotante.
- Pontona sumergible guiada desde estructuras fijas.
- Catamarán con plataforma sumergible.

Todas las grandes empresas constructoras españolas (y algunas de las medianas) disponen de estas instalaciones.

El proceso constructivo del cajón consiste en hormigonar la solera para, a continuación, deslizar el fuste del mismo, normalmente de forma continua. A medida que se hormigona el cajón, éste va sumergiéndose en el agua. En la figura 2 puede verse un ejemplo de la secuencia del proceso constructivo con un dique flotante.

En el caso de cajones con esloras importantes, deberá prestarse especial atención a la existencia de puntos duros en la cimentación y deberá estudiarse el proceso de llenado de celdas de acuerdo con este condicionante.

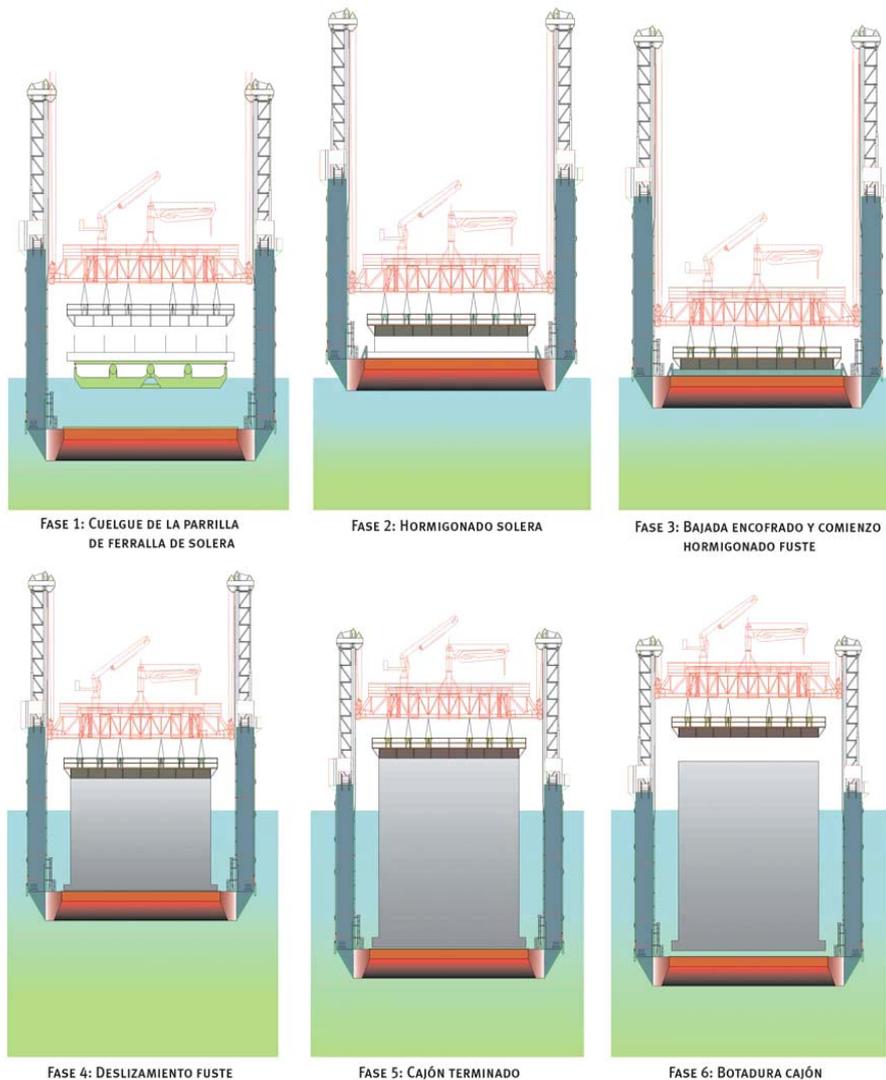


Fig.2 Proceso constructivo típico de un cajón flotante

Para la construcción de cajones con medios flotantes se requieren las siguientes **instalaciones auxiliares**:

- Muelle o línea de atraque, y elementos de guiado en el caso de pontona sumergible, y emplazamientos para pasarela de acceso y grúa torre, así como provisión de espacio, en tierra o en el fondo marino, para las amarras, en el caso de dique flotante o catamarán. El dique flotante, a este respecto, es menos exigente que los sistemas de pontona o catamarán. Además debe tener calado suficiente para que pueda botarse el cajón, contando con el espesor de la base de la instalación flotante y un resguardo del orden de 1 m, aunque se deberá hacer un estudio específico en cada caso.
- Instalación de grúa torre próxima al cajonero, con alcance en toda la planta del cajón, parque de ferralla, acopio de la misma al alcance de la grúa torre, e instalación de bombeo del hormigón.
- En la fase de construcción deben disponerse en el cajón los oportunos puntos de amarre para su transporte y fondeo.

El transporte suele realizarse con un remolcador que tira en proa. Puede utilizarse un remolcador complementario en popa que hace las labores de timón.

Una vez trasladado el cajón a su punto de fondeo, es necesario asegurar su correcto posicionamiento. El control de posición del cajón durante el fondeo puede realizarse de acuerdo con distintos procedimientos:

- Fijando el cajón a puntos fijos (cajones previamente fondeados, puntos de amarre en tierra o en otras estructuras, muertos de anclaje fondeados, o cualquier combinación de los anteriores), y empleando trácteles o cabrestantes para el posicionamiento. Un ejemplo de este procedimiento se representa en la figura 3.
- Empleando embarcaciones auxiliares, como remolcadores, gánguiles o pontonas, que actúan mediante elementos de tiro (cabrestantes) o abarloados al cajón.
- Combinación de los anteriores.

El fondeo se realiza mediante inundación de las celdas hasta que el cajón toca fondo. Una vez verificada su posición final es habitual rellenar la totalidad de las celdas con agua, para evitar que lo ponga en flotación la marea llenante. Finalmente, con el mínimo desfase temporal posible, con el fin de asegurar su estabilidad, se procede al llenado de celdas con material granular.

La potencia y capacidad de los medios de control del posicionamiento del cajón varían considerablemente en función de si se trata de aguas protegidas o de aguas exteriores, y del nivel de agitación en el que se va a realizar la maniobra.

En el fondeo de cajones del dique, es determinante el estado del mar, tanto en lo que se refiere a la altura como al período del oleaje.

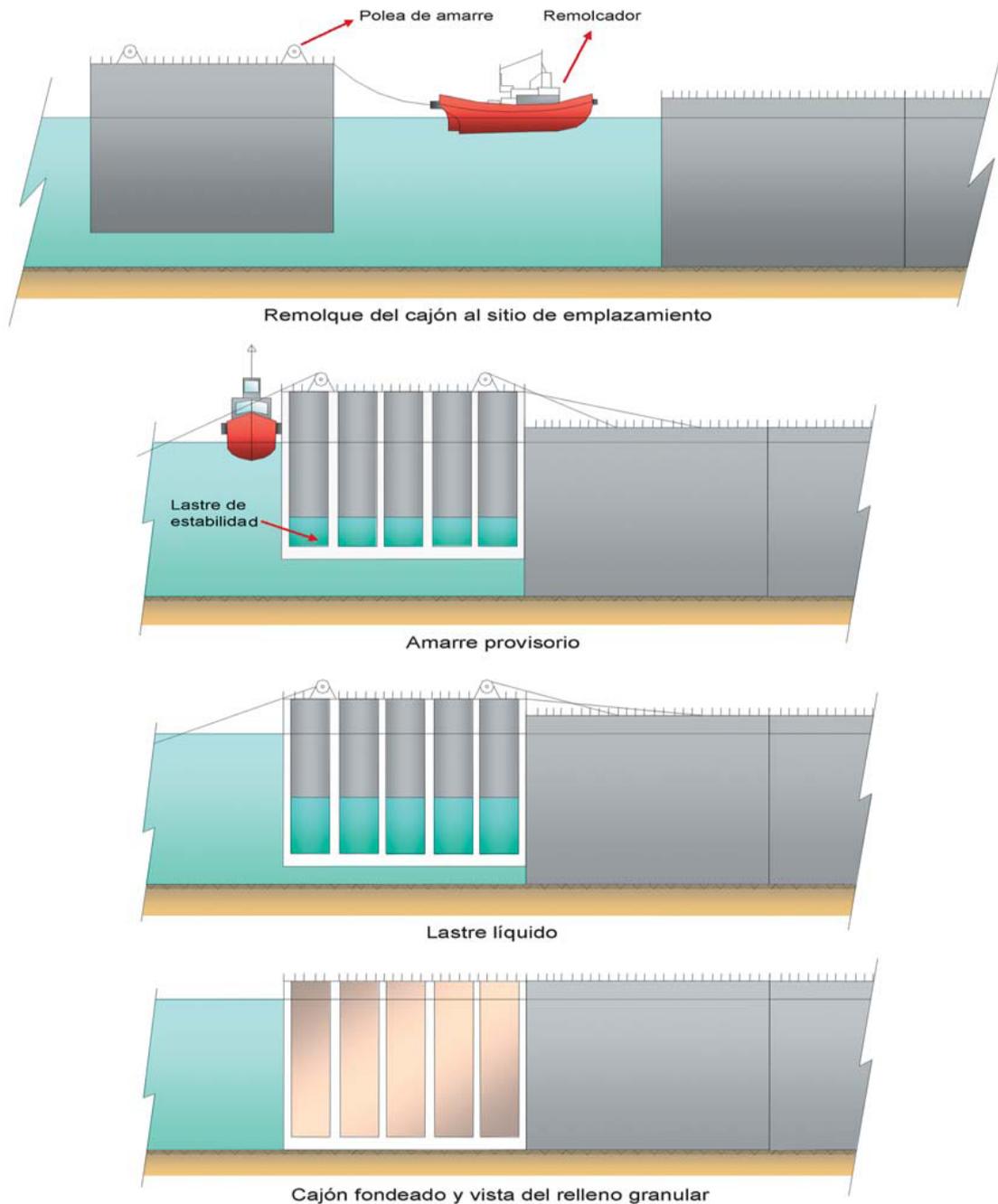


Fig.3 Proceso de fondeo de un cajón flotante

El procedimiento más utilizado para la ejecución de cajones portuarios es la técnica de los **encofrados deslizantes**. Este método, que da lugar a altos rendimientos y resulta particularmente apropiado para una estructura tan regular como un cajón portuario, implica la necesidad de no interrumpir el trabajo (deben disponerse 3 turnos de trabajo) y exige por otra parte unas condiciones muy específicas al hormigón. Estas condiciones son:

- Rapidez de fraguado (a las 4- 6 horas debe tener una resistencia mínima de 0.2 MPa, con objeto de que sea capaz de soportar su peso propio).
- Su resistencia debe crecer con mayor rapidez que la carga aplicada.
- Docilidad, facilidad de compactación, buena adherencia a la armadura y rozamiento reducido sobre el encofrado.

- Su calidad y docilidad deben permanecer inalteradas a lo largo de la ejecución de la obra, lo cual supone un control estricto de la dosificación y tiempos de transporte.
- El cemento a utilizar debe tener alta resistencia inicial y poca retracción.
- Es recomendable el uso de árido rodado aunque esto no es siempre posible.
- El tamaño máximo del árido debe estar entre $1/5$ y $1/7$ del espesor de la pared y debe ser siempre inferior a 30 mm.

Como particularidad de este sistema, debemos mencionar que el hormigón quedará sumergido, (en agua de mar, normalmente) al poco tiempo de su colocación, por lo que no se cumplen con los tiempos mínimos de curado antes de su inmersión, marcados por la EHE. Sin embargo, la amplia y satisfactoria experiencia existente es garantía de la bondad del sistema constructivo.

5. Dimensionamiento estructural del cajón

Como cualquier estructura, el cajón debe dimensionarse para soportar los esfuerzos generados por las acciones a lo largo de toda su vida útil.

Las **acciones** son las siguientes:

Cargas permanentes

El peso propio, el empuje de Arquímedes, la carga muerta, el empuje hidrostático, peso de las tierras (sobre las zapatas) y acciones verticales debidas al peso del material ensilado.

Cargas permanentes de valor no constante

Acciones horizontales debidas a las tierras del material ensilado y acciones debidas al empuje de tierras en trasdós de muro.

Cargas variables

Sobrecargas de uso y explotación, oleaje (tanto en seno de la ola como en cresta).

Acciones extraordinarias

Sismo y oleaje extraordinario (sólo para el caso de diques).

Sólo son previsibles tracciones en dirección horizontal. Tracciones verticales sólo son previsibles en el caso de cajones para diques.

Los esfuerzos generados por los empujes que van hacia fuera del cajón (relleno de celdas con agua y material granular) darán lugar a esfuerzos de flexo-tracción y viceversa.

En la presentación, se describirán, con más detalle, estas acciones y los esfuerzos que se generan.

6. El problema del cortante

Los cajones portuarios se caracterizan por ser elementos con cuantías de armadura muy bajas y por carecer de armadura de cortante. Por ello uno de los problemas que se abordaron al redactar el *Manual de Cajones* fue la adaptación del modelo de verificación a cortante de la EHE al caso específico de los cajones portuarios. Como ocurre con otros elementos estructurales, muchos de los cajones proyectados en el pasado sin armadura de cortante no cumplen con la Instrucción, a pesar de que la experiencia acumulada en el comportamiento de estos elementos sugiere que su diseño es adecuado.

Esta contradicción ha sido el objeto de varios estudios por parte del Grupo de Hormigón estructural (ver [1], [2], [3]). De forma resumida, se puede afirmar que el modelo de la EHE (cuyo origen está en los trabajos de Zsutý[4]) es un modelo empírico que está ajustado a datos experimentales que corresponden a ensayos de vigas isostáticas sometidas a dos cargas puntuales (o una sola situada en centro de vano), con la condición de que dichas cargas estén situadas una distancia del apoyo superior a $2.5d$, siendo d , el canto útil del elemento (ver base de datos de Reineck y Kuchma [5]). La comparación de los resultados obtenidos con el modelo de la EHE y los resultados experimentales correspondientes a ensayos hechos

con carga puntual revela que dicho modelo está muy bien ajustado para este tipo de carga, incluso para los casos más normales en la práctica profesional en los cuales la cuantía de armadura longitudinal es pequeña (inferior al 1%).

Puesto que el problema no es que el modelo tenga una seguridad excesiva, se ha buscado una explicación en la diferencia que existe entre el tipo de carga aplicada en los ensayos (carga puntual a más de $2.5d$ del apoyo) y el tipo de carga al que están realmente sometidos los distintos elementos de los cajones portuarios (cargas uniformemente distribuidas). La comparación del modelo de la EHE con ensayos de vigas cargadas con carga uniformemente distribuida revela que dicho modelo sí queda muy del lado de la seguridad para este tipo de sollicitación si, para la verificación, se considera el valor del cortante a una distancia de un canto útil del apoyo como prescribe la Instrucción.

Una posible explicación de esta constatación experimental se encuentra en el efecto arco. El efecto arco se manifiesta de forma muy clara en los ensayos con carga puntual mediante un aumento muy pronunciado de la capacidad resistente a cortante cuando la carga se aproxima al apoyo, particularmente para distancias inferiores a $2.5d$ (ver, por ejemplo Kani [6]). Con esta base, se planteó la idea de modificar la sección de verificación a cortante considerando una sección de control situada a una distancia del apoyo superior a d . Ello permitiría tener en cuenta que una mayor parte de la carga aplicada se transmite sin solicitar el alma a tracción mediante la acción de una biela inclinada un ángulo mayor de 45° .

Para poder contrastar esta posibilidad para el rango de parámetros que se da en el caso de cajones portuarios, y dentro del marco del convenio Puertos del Estado-UPM, se llevó a cabo una campaña experimental de elementos isostáticos e hiperestáticos¹ sometidos a carga puntual y carga uniforme cuyo diseño (dimensiones, cuantías de armadura) se hizo de tal manera de que fueran representativos de los distintos elementos estructurales que forman un cajón portuario: paredes interiores, paredes exteriores y solera.

En la figura 4 y la tabla 1 se muestran las características de los ensayos llevados a cabo. Estos ensayos permiten evaluar, en las mismas condiciones, el efecto del tipo de carga y poder determinar la sección de control experimentalmente, igualando el cortante en dicha sección con el cortante resistido en el ensayo de carga puntual (ver Ec. 1).

$$V_{u,P} = q_u \times \left(\frac{L}{2} - x \right) \rightarrow \left(\frac{x}{d} \right)_{crit} = \left(\frac{L}{2} - \frac{V_{u,P}}{q_u} \right) \quad (1)$$

donde:

$V_{u,P}$ cortante de rotura para la viga sometida a carga puntual
 q_u carga por metro lineal que produce la rotura en ensayo de carga distribuida

¹ Los resultados de estos ensayos (entre otros) serán publicados en la Tesis Doctoral de Patricio Padilla.

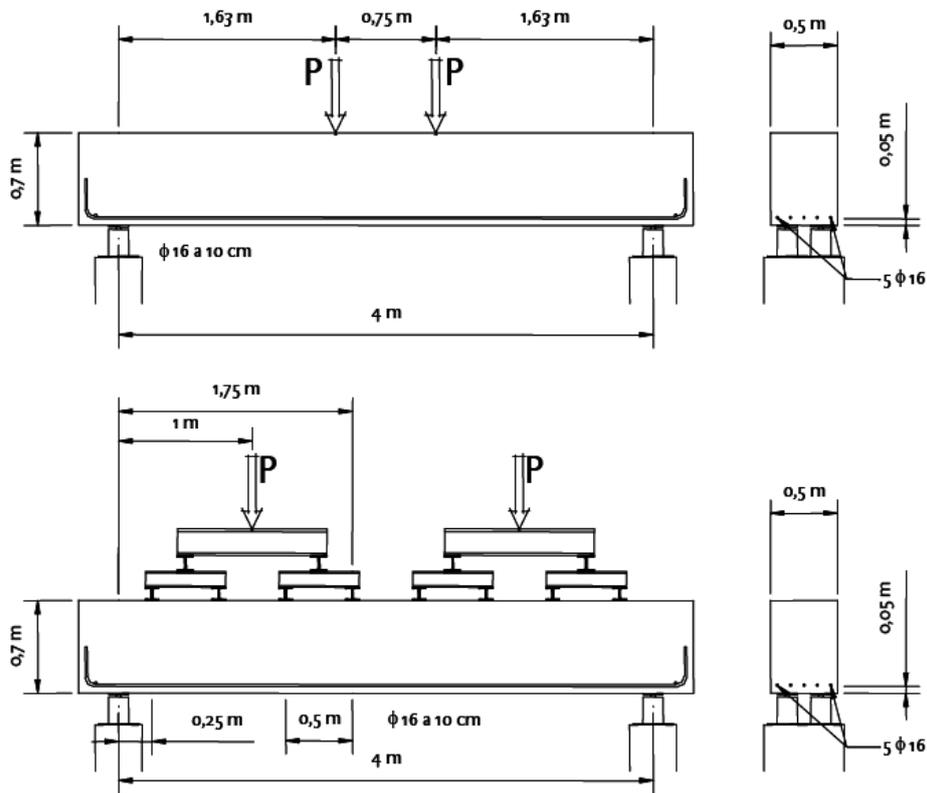


Fig. 4 Esquema de ensayo de vigas isostáticas

ELEMENTO Y ARMADURA	f_c	f_y	b [mm]	h [mm]	d [mm]	A_s	$\rho_{s,l}$
* LOSA DE CIMENTACIÓN							
$\emptyset 16$ a 0.10 m	35	500	500	700	650	1005	0.0031
$\emptyset 20$ a 0.10 m	35	500	500	700	650	3140	0.0048
$\emptyset 25$ a 0.10 m	35	500	500	700	650	4910	0.0076
*PARED EXTERIOR							
$\emptyset 12$ a 0.10 m	35	500	500	400	350	1130	0.0032
*PARED INTERIOR							
$\emptyset 12$ a 0.20 m	35	500	500	250	200	680	0.0034

Tabla 1 – Características de los elementos ensayados

Estos ensayos, llevados a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos, dieron como resultado un valor de $(x/d)_{crit}$ aproximadamente igual a 1.5 en el caso más desfavorable, correspondiente a elementos poco esbeltos (solera). Si el análisis se extiende a otros ensayos disponibles en la bibliografía se observa claramente que la posición de la sección crítica depende de la esbeltez y que la sección de verificación se aleja del apoyo a medida que aumenta la esbeltez del elemento (ver figura 5).

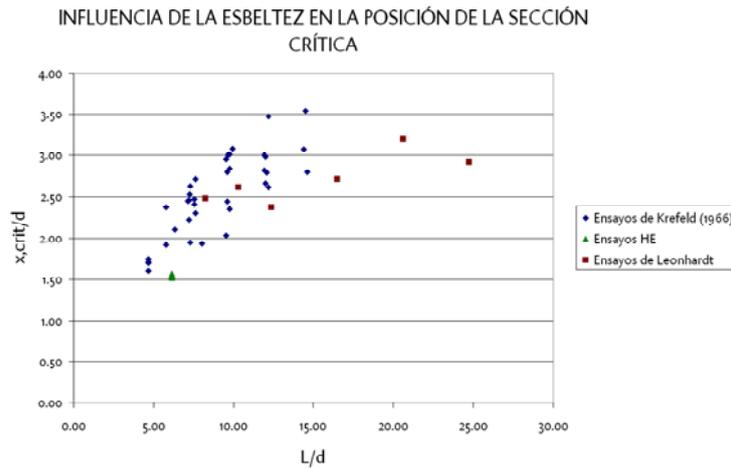


Fig. 5. Influencia de la esbeltez en la posición de la sección de control

Con esta base y con el ánimo de mantenerse del lado de la seguridad, se redactó el artículo correspondiente a la verificación a cortante del Manual de Cajones que fija en $1.5d$ la distancia desde el apoyo de la sección para la cual se debe comprobar el cortante. En la figura 6 se muestra el criterio para determinar la posición de esta sección en las zonas acarteladas.

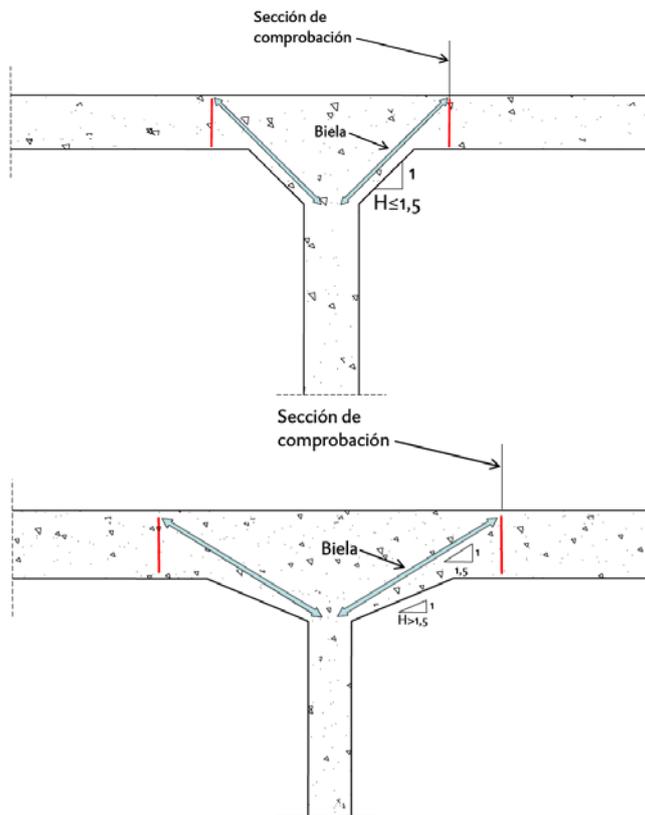


Fig.6 Definición de la sección de control en el caso de nudos con cartelas

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Pérez, A., Padilla, P. Corres, H. *Análisis de piezas sometidas a cortante con bajas cuantías de armadura longitudinal. Estudio teórico de elementos estructurales con estas características y definición de un programa experimental de investigación.* Hormigón y Acero N° 233. 2004.

- [2] Pérez, A., Padilla, P., Corres, H., León, J. *Comprobación a cortante de elementos sin armadura transversal. Investigando la contradicción entre la teoría y la práctica.* III Congreso ache. Zaragoza 2005.
- [3] Padilla, P. *Capacidad resistente a cortante de elementos de hormigón armado con bajas cuantías de armadura longitudinal y sin armadura transversal. Determinación de la sección de comparación.* Trabajo de Investigación tutelado. Tutor: A Pérez. 2006.
- [4] Zsuty, T.C. Shear Strength Prediction for Separate Categories Of Simple Beam Tests. *ACI Structural Journal* nº68. 1971, pp 138-143.
- [5] Reineck, K.H, Kuchma, D.A, Kim, K.S., Marx, S. *Shear Database for Reinforced Concrete Members without Shear Reinforcement.* *ACI Journal* nº100. 2003, pp 240-249.
- [6] Kani, G.N.J. *Basic Facts Concerning Shear Failure.* ACI nº63 (1966)