

“SOLUCIONES PARA VIGAS DE ATADO EN MUELLES DE CAJONES FLOTANTES”

Franzisko Xavier Unzaga Serei / José María Vilchez Moya

Universitat Politècnica de Catalunya / Máster en Ingeniería Estructural y de la Construcción

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

franzisko.unzaga@gmail.com- jose.maria.vilchez.moya@gmail.com

Resumen: este documento tiene como finalidad establecer criterios comunes al momento de buscar una solución para vigas de atado en muelles de cajones flotantes. Para esto, se analizará una tipología de viga de atado en concreto, obteniéndose información y datos sobre la misma. Así, lo que se busca es que esta información sirva de referencia y pueda ser extrapolada, cuando sea pertinente, a otros proyectos.

Palabras clave: muelle, cajones flotantes, viga de atado, superestructura, asentamientos diferenciales, monolitismo.

1. Introducción

Las infraestructuras marítimas son obras fundamentales para el desarrollo de un país. En el caso particular de los muelles, éstos son de suma importancia para el adecuado tránsito de buques de carga y descarga. Estas estructuras sirven de defensa y amarre ante al atraque de naves, además de alojar las grúas encargadas de la descarga de las mismas y del acopio de contenedores. Debido a tal importancia, las técnicas de construcción de muelles han evolucionado a pasos agigantados, siendo el método de cajones flotantes uno de los más eficaces, cuando las condiciones de sitio permiten su aplicación.

En España, las primeras aplicaciones de ésta técnica se remontan a la década de los años 30 del siglo pasado; de ahí en adelante, su uso ha ido en constante aumento. Actualmente, este país es uno de los más avanzados en la construcción de muelles de cajones flotantes de hormigón armado, desarrollo solo comparable con Japón.

Como en cualquier obra de este tipo, tanto la infraestructura como la superestructura juegan un papel fundamental en su comportamiento y buen desempeño; sin embargo, en muelles de cajones flotantes, el elemento de la superestructura que cobra especial importancia es la viga de atado (o viga cantil). Esta importancia radica en la función que cumple este elemento, a cual se explicará en el desarrollo de este documento.

Debido a la compleja función de la viga de atado, es común encontrar diversos inconvenientes, tanto en la fase de proyecto como en la de ejecución. Esto se ve acentuado por la falta de documentación técnica al respecto, falta que, a su vez, es el

resultado de la heterogeneidad de factores que influyen en el diseño y ejecución de las vigas de atado, lo que hace que cada proyecto sea particular y sea muy difícil encontrar patrones comunes.

Esta última idea es, precisamente, la que persigue este documento: establecer criterios comunes que permitan abordar, de manera general, la búsqueda de una solución para vigas de atado en muelles de cajones flotantes y, así, contar con una base que permita determinar, de manera particular, la solución que mejor se adecúe a cada proyecto.

Para ello, primero se hará una breve descripción del sistema constructivo de muelles con cajones flotantes de hormigón armado; se planteará la definición y razón de ser de una viga de atado en esta clase de muelle. Se identificarán algunos elementos particulares de la superestructura y su influencia sobre las vigas de atado. Se presentarán algunas tipologías seccionales de este tipo de vigas, definiéndose una sección tipo sobre la cual se estructurará este documento. Además, se explicará el sistema de encofrado para estas vigas, para luego pasar a la definición de los requisitos de diseño y un ejemplo de cálculo. Seguidamente, se presentará un proceso constructivo recurrente para la materialización de vigas de atado, para luego proponer algunas recomendaciones de ejecución. Finalmente, se entregarán algunas conclusiones extraídas de la realización de esta investigación.

2. Muelles de cajones flotantes de hormigón armado

Como se ha comentado en la introducción, España es uno de los países más avanzados en la construcción de muelles de cajones flotantes de hormigón armado. A pesar de que no cuenta con una normativa oficial para este tipo de obras, sí posee un manual redactado por un organismo oficial como es Puertos del Estado, que ha desarrollado un “Manual para el Diseño y la Ejecución de Cajones Flotantes de Hormigón Armado para Obras Portuarias”. En este texto se recogen los tipos estructurales y dimensiones de los cajones, los requisitos esenciales y las bases de cálculo para proyectar dichos cajones, así como los materiales a emplear. Además, este manual hace referencia a aspectos de durabilidad,

sistema constructivo, control y mantenimiento de este tipo de estructuras.

En la figura 1 se pueden observar los principales elementos de un muelle formado por cajones flotantes de hormigón armado.

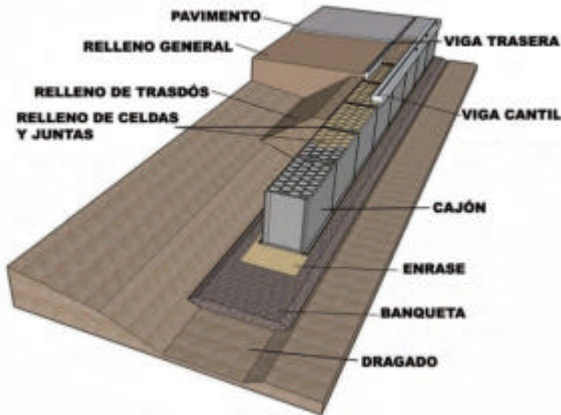


Fig. 1: Vista 3D muelle sobre cajones flotantes.

La construcción de cajones puede realizarse en instalaciones flotantes o terrestres; sin embargo, lo habitual es que se construyan en instalaciones flotantes, tales como, dique flotante, pontona sumergible guiada desde estructuras fijas, o catamarán con plataforma sumergible.

El proceso constructivo del cajón consiste en hormigonar la solera y luego, deslizar el fuste, normalmente de forma continua. Una vez terminado el cajón, se procede a su botadura, traslado, posicionamiento y fondeo, como se ilustra en la figura 2.

La botadura se realiza por simple descenso de la plataforma del dique flotante. El traslado del cajón a su punto de fondeo se realiza a través de un remolcador que tira en proa. Complementariamente, puede utilizarse un remolcador en popa que haga las funciones de timón. Una vez trasladado el cajón hasta su punto de fondeo, éste se debe posicionar correctamente. Esto se hace, por ejemplo, atando el cajón a puntos fijos (ubicados en cajones ya fondeados o en tierra) y utilizando cabrestantes. Una vez terminado el posicionamiento, se procede al fondeo provisional mediante inundación de las celdas hasta que el cajón toca fondo. Verificada su posición final, es habitual rellenar la totalidad de las celdas con agua para evitar que la marea llenante ponga el cajón en flotación. Finalmente, con el fin de asegurar su estabilidad, se procede al llenado de las celdas con material granular.

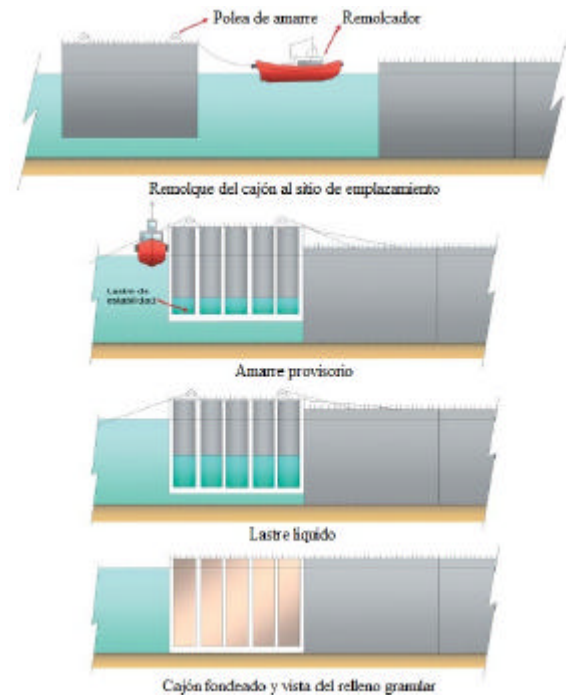


Fig. 2: Procedimientos de fondeo de un cajón.

3. Vigas de atado en muelles de cajones flotantes

Las vigas de atado de muelles de gravedad (en este caso de cajones flotantes) son normalmente vigas de hormigón armado, construidas “in situ”, que cierran el extremo superior externo del muelle.

Los objetivos de esta estructura en servicio son:

- Otorgar monolitismo al muelle.
- Aminorar el efecto de los asentamientos diferenciales entre cajones.
- Servir de cierre de explanadas.
- Conseguir la correcta alineación del muelle.
- Permitir el anclaje de bolardos, defensas, escalas, etc.
- Alojar canalizaciones de agua, electricidad, red contra incendios, etc.
- Guiar y soportar los movimientos de la grúa.

La viga de atado en un muelle de cajones flotantes se podría definir como el elemento estructural encargado de otorgar monolitismo al muelle, de manera que cada elemento trabaje solidariamente. A medida que se fondean los diversos cajones, el muelle va tomando forma; sin embargo, hasta este punto no deja de ser un conjunto de cajones trabajando independientemente entre sí. Será la superestructura la encargada de hacer que este conjunto se transforme en un muelle, es decir, en una estructura continua. El elemento principal de esta superestructura es la viga de atado, la cual deberá “atar” un cajón con otro y, de esta manera,

conseguir que el muelle trabaje como una estructura monolítica.

Por otra parte, la viga de atado cumple la función de aminorar el efecto de los asientos diferenciales entre cajones. Al igual que cualquier estructura de hormigón armado, un muelle de cajones flotantes no admite asientos diferenciales; no obstante, éstos ocurren y la ingeniería no tiene control total sobre ellos, por lo que solo es posible estimarlos. Debido a esto, es necesario proyectar elementos que puedan aminorar los efectos de estos asientos sobre la estructura.

Complementariamente, la viga de atado hace la función de cierre de explanadas, conectándose con la losa de cierre posterior del muelle, la cual recibirá el relleno y posterior pavimento de la explanada. La viga de atado, además, consigue la correcta alineación del muelle a través de su sección transversal, la cual vuela sobre los cajones hacia el lado mar. Este voladizo absorbe las irregularidades en la posición final de los cajones, debidas tanto a la falta de verticalidad de éstos como a las diferencias entre cajones adyacentes. Además, hace la función de protección para los cajones ante posibles impactos de embarcaciones. En el apartado cinco se pueden observar algunas tipologías seccionales donde es posible identificar este elemento.

De acuerdo con las características del muelle, la viga de atado puede tener, además, las funciones de atraque y amarre de naves, alojamiento de canalizaciones y soporte de los carriles de la grúa. De las características de estos sistemas y su influencia se hará mención en el siguiente apartado, por ahora lo que interesa es observar que la viga de atado tiene diversas funciones según las características del muelle y del uso que se le vaya a dar.

En el caso que la viga de atado sirva de soporte para los carriles de la grúa, es importante mencionar que los efectos de los asientos diferenciales entre cajones tienen cobran una importancia aún mayor, ya que la grúa se desplaza sobre los carriles y puede trabajar hasta un cierto valor de pendiente sin verse afectada su operatividad. Es decir, que el criterio para salvar los asientos diferenciales entre cajones lo determinará el hecho de estar en presencia de equipos de esta naturaleza, los cuales son muy sensibles a los cambios de nivel. En tal caso, existen diversos sistemas para aminorar los efectos de los asientos diferenciales, siendo uno de los más eficaces el utilizar una viga de junta de cajones incorporada dentro de la viga de atado. Sobre este sistema en particular se hará referencia en apartados posteriores.

4. Elementos particulares de la superestructura

Como se ha indicado, la superestructura puede tener entre sus funciones el atraque y el amarre de naves y el soporte de los carriles de la grúa. Para cada una de estas funciones, la superestructura debe albergar sistemas o elementos especiales, o bien, adecuar su sección transversal convenientemente según lo requieran el o los equipos que vayan a afectarla. Así, de acuerdo a cada función es posible encontrar los siguientes elementos en la superestructura.

4.1. Defensas para el atraque de naves

Las defensas del muelle tienen como fin recibir el impacto de las naves al atracar, disipando su energía y, de esta manera, evitar impactos directos sobre la estructura de hormigón armado. A pesar de que estos sistemas utilizan disipadores de energía, los esfuerzos que se introducen en la viga de atado son muy elevados. Debido a esto, se debe disponer de una armadura especial en esta zona de la viga, con el objetivo de transmitir adecuadamente los esfuerzos dentro de la pieza. Los anclajes de estos elementos pueden dejarse embebidos en el hormigón, o bien, realizar taladros, introducir los anclajes e inyectarlos, una vez terminado el módulo que deba albergar este sistema.

4.2. Sistema de amarre de naves: bolardos

Las naves, al estar atracadas en un muelle, no están en reposo debido al constante movimiento del mar, introduciendo grandes tensiones a los sistemas de amarre o bolardos. Por esta razón, éstos deben estar debidamente anclados a la viga de atado y ésta, a su vez, debe poseer una armadura especial en esa zona (ver figura 3), de manera que las tensiones se distribuyan adecuadamente dentro de la estructura.

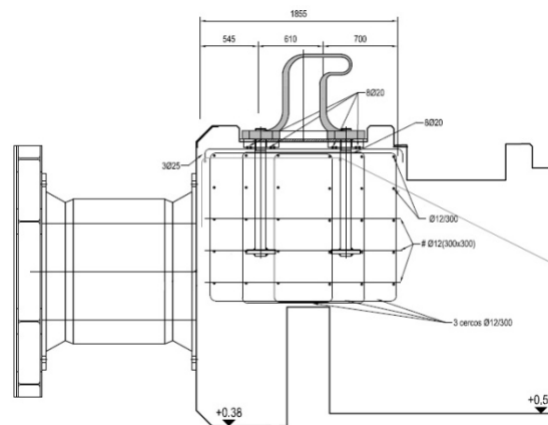


Fig. 3: Esquema de armado en zona de bolardo.

elemento en particular, el cual se ubicará en la zona en cuestión.

- Zona A: elementos de defensa.
- Zona B: elementos de amarre o bolardos.
- Zona C: cajeadado para cableado eléctrico de la grúa.
- Zona D: cajeadado para carril de la grúa, lado mar.

El desarrollo de este documento se realizará sobre esta sección ya que es posible obtener información sobre diversos aspectos que serán de gran interés para el proyecto y ejecución de este tipo de estructuras.

6. Sistemas de encofrado

Un aspecto fundamental y que normalmente conlleva diversas complicaciones, es el sistema de encofrado de la viga de atado. Como es de esperar, con tan variadas tipologías seccionales, el encofrado de la viga es bastante complejo.

Debido a que el muelle es una obra lineal, y por ende la viga de atado, cuando la longitud sea mayor a 200 m, es recomendable la utilización del sistema de carros de encofrado.

En el mercado existen empresas especializadas en la confección de este tipo de encofrado. No obstante, es recomendable tener presente algunas características técnicas para la determinación del encofrado:

- La longitud del carro no debe ser mayor a 10 m para facilitar su manejo.
- La longitud útil de cada puesta será tal que las juntas de construcción coincidan con las juntas entre cajones.
- La distancia entre las defensas y entre los bolardos debe ser múltiplo de la longitud del encofrado, de manera que los anclajes de estos elementos queden siempre en la misma posición respecto del carro.
- El carro debe tener holgura suficiente para absorber irregularidades en el paramento inferior, es decir, en la coronación de los cajones.
- El carro debe permitir la construcción de distintos elementos: cajeadado y carril de la grúa, anclaje de defensas, bolardos y escalas, canaletas y conducciones, cantoneras (elementos metálicos que se colocan a lo largo de todo o parte del borde superior externo de la viga de atado), etc.

Debido a las diversas tipologías seccionales que puede tener una viga de atado, normalmente se debe fabricar un carro para cada obra.

En la construcción de vigas de atado con inclusión de anclajes para bolardos y defensas, cajeadado para cableado eléctrico, canaletas, etc., un rendimiento habitual es hormigonar un módulo cada

dos días. En ocasiones, con encofrados adecuados y equipos muy experimentados, se ha alcanzado un módulo por día. Como también, en otras ocasiones, debido a factores adversos, se ha alcanzado un módulo cada cuatro días. Es decir, el rendimiento de esta partida es muy sensible y dependerá de las condiciones de cada proyecto.

La secuencia de construcción de vigas de atado con carros de encofrado es la siguiente:

- 1° Regularización de la superficie: para permitir la rodadura del carro de encofrado y proporcionar una superficie donde colocar adecuadamente las armaduras.
- 2° Liberación del carro de encofrado del módulo ya hormigonado y avance del mismo hasta la siguiente posición.
- 3° Limpieza y colocación del carro de encofrado
- 4° Colocación de las armaduras y de los elementos de anclaje: se asegurará el correcto recubrimiento y posición de los anclajes dentro de la tolerancia que se requiera, la cual puede ser muy estricta.
- 5° Hormigonado: se controlará que no se produzcan movimientos del carro de encofrado y/o de los elementos incorporados.

En la figura 6 se puede observar una ilustración de un sistema de encofrado deslizante, mientras que en la figura 7 se presenta una imagen del encofrado deslizante utilizado para materializar la sección de estudio.

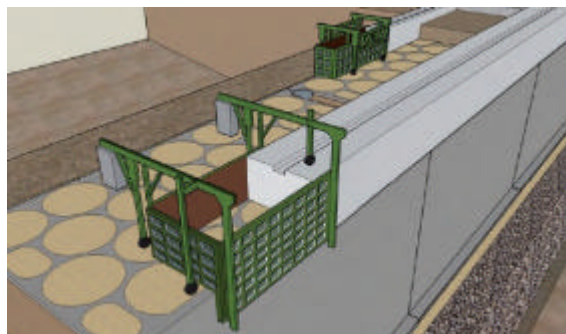


Fig. 6: Esquema 3D de un carro de encofrado.



Fig. 7: Carro de encofrado utilizado en la sección de estudio.

En las figuras presentadas se puede observar que los encofrados deslizantes son estructuras bastante complejas, las cuales no están exentas de problemas. El aspecto que requiere mayor atención, y que es fuente de constantes problemas para los ingenieros a cargo de la ejecución de una viga de atado, es el desplazamiento del carro. Al terminar un módulo y estar en condiciones de desplazarse hasta el módulo adyacente, la maniobra de desplazamiento es bastante engorrosa debido a la sensibilidad del carro ante cualquier imperfección u obstáculo.

Otro problema que suele presentarse, aunque más llevadero, es la falta de completa estanqueidad del encofrado. Debido a que la obra se ubica en primera línea frente al mar, este aspecto en determinadas ocasiones puede suscitar problemas, especialmente cuando se está en presencia de fuerte oleaje.

7. Requisitos de diseño y cálculo del armado

En este apartado se plantean los requisitos que deben cumplir las vigas de atado, desde sus materiales, pasando por la durabilidad, hasta su armado, el cual debe ser tal que responda satisfactoriamente ante las cargas introducidas por los diversos elementos de la superestructura.

7.1 Clases de exposición ambiental

Se considera que la superestructura del muelle se sitúa en zona con ambiente marino y con salpicaduras, por lo que, siguiendo los criterios de la EHE-08. Suele utilizarse una única calidad de hormigón en toda la dimensión de la superestructura. En este caso, la clase general de exposición a considerar para la viga de atado (desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras), será IIIc. Desde el punto de vista de ataques al hormigón por fenómenos distintos a la corrosión de las armaduras, se considera que está expuesta a ataque químico de agresividad media, Qb.

Las dosificaciones y requisitos recomendables para un hormigón situado en ambiente IIIc + Qb, se detallan a continuación:

- La relación agua/cemento será inferior o igual a 0,45.
- El contenido mínimo de cemento será de 350 kg/m³.
- La resistencia mínima del hormigón será de 35 N/mm².
- El recubrimiento nominal será de 50 mm.

7.2 Materiales

Los materiales a emplear en la construcción de la viga de atado son:

- Hormigón estructural: HA-35/P/20/IIIc+Qb
- Acero en armaduras pasivas: B 500 S

Se contempla un recubrimiento de 50 mm. Este valor será el utilizado en los cálculos posteriores.

Los coeficientes de minoración de resistencia de materiales son los definidos en la EHE-08, los cuales figuran en la tabla I.

Situación de proyecto	Hormigón γ_c	Acero pasivo y activo γ_s
Persistente o transitoria	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,0

Tabla I: Coeficientes de minoración de resistencia.

Los requisitos estructurales que deban cumplir las vigas de atado dependerán de las funciones que ésta vaya a realizar en la superestructura. Suponiendo que a la viga de atado se le dará todo su uso posible, las funciones que ésta debe cumplir serán los indicados en el apartado dos.

7.3 Acciones

Los coeficientes parciales de seguridad a emplear en la evaluación de los estados límite último y de servicio serán los indicados en el capítulo 3 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

El valor característico de las cargas permanentes, tanto para el peso propio como para las cargas muertas, se deduce aplicando los pesos específicos correspondientes a las dimensiones reales de los distintos elementos. A estos efectos se consideran los pesos específicos indicados a continuación:

- Hormigón armado $\gamma_c = 2,5 \text{ t/m}^3$
- Hormigón en masa $\gamma_c = 2,4 \text{ t/m}^3$
- Acero estructural $\gamma_s = 7,85 \text{ t/m}^3$
- Acero armaduras $\gamma_c = 7,85 \text{ t/m}^3$

Respecto de las cargas variables y de uso, en el diseño de vigas de atado es recomendable considerar las acciones que actúan sobre los cajones, ya que, debido a su importancia, normalmente el diseño de éstos se realiza a través de programas de cálculo que utilizan el método de los elementos finitos (MEF), con lo que su comprobación es bastante certera.

En la figura 8 es posible observar el estilo de grúas que comúnmente se utilizan en muelles de carga y descarga, y que serán considerados en este documento para determinar las acciones sobre la viga de atado.



Fig. 8: Grúa ASC (izquierda) y grúa Liebherr LMH 500 (derecha).

Las cargas introducidas por una grúa tipo Liebherr LMH 500 se indican en la tabla II.

Situación	Ángulo de la pluma en planta	Carga en una pata (t)
Estática	45	269,7
	90	247,0
Dinámica (sin viento)	45	357,5
	90	283,4
Dinámica (con viento)	45	371,3
	90	285,3

Tabla II: Cargas de la grúa Liebherr LMH 500, de movilidad no restringida.

Las acciones variables consideradas que pueden actuar sobre la superestructura, además de las cargas permanentes, son las siguientes:

- Sobrecarga uniforme en área de operación: 3 t/m² repartida en todo el cajón.
- Carga de movilidad restringida debido a la presencia de una grúa de apilamiento automático ASC. Toma un valor de 110 toneladas por rueda. A esta carga hay que añadirle el efecto dinámico que se estima en un incremento del 15%.
- Carga de equipo de manipulación de contenedores de movilidad no restringida: Se toman las cargas introducidas por una grúa tipo Liebherr LMH 500. Se trata de una grúa de 452 t de peso, con una capacidad de carga de hasta 140 t. La máxima carga sobre una pata, con un ángulo en planta de la pluma de 45° y teniendo en cuenta el factor dinámico y la acción del viento, es de 371,3 toneladas. Esta carga se reparte en un escudo de 5,50 m x 1,80 m.

La carga más desfavorable para la estructura, y que dimensionará la armadura, es la introducida por la pata delantera de la grúa de movilidad restringida.

Para los cálculos que se van a desarrollar en este punto se transforma esta carga en la correspondiente carga lineal repartida, de valor:

$$p = 110 \times 8 \text{ ruedas} / 7,90$$

$$p = 111,40 \text{ Tn/m (ya mayorada)}$$

Para este cálculo se consideran vigas de un metro de ancho con una distancia entre apoyos, estando del lado de la seguridad, igual al diámetro de las celdas del cajón.

7.4 Cálculo del armado

Para el dimensionamiento de la viga de atado, se emplea la metodología indicada en el artículo 63° de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, método de bielas y tirantes para vigas de gran canto. Dadas las dimensiones de la viga de atado, este método es el más adecuado y cumple la condición que se impone en dicha instrucción: “Se consideran como vigas de gran canto las vigas rectas generalmente de sección constante y cuya relación entre la luz, l, y el canto total h, es inferior a 2, en vigas simplemente apoyadas, o a 2,5 en vigas continuas”.

$$\frac{l}{h} \leq 2$$

$$\frac{l}{h} = \frac{3,71}{2,5} = 1,48 \leq 2 \quad (1)$$

No obstante, en algún caso puede que dadas las dimensiones de una determinada viga de atado, ésta no cumpla este requisito y no sea posible aplicar tal método. En tal caso se deberá aplicar la teoría clásica de vigas; sin embargo, la práctica indica que, en general, las vigas de atado se comportan como vigas de gran canto.

Dadas las dimensiones de la viga de atado, para el cálculo del armado deberá considerarse un armado en sentido paralelo al muelle y otro en sentido perpendicular al mismo, creando una malla de armado.

Así, la modelización mediante el método de bielas y tirantes, para el armado en sentido paralelo al muelle, se realiza como una viga continua de número indefinido de vanos de igual longitud con carga uniformemente repartida de 111,40 t/m, considerando una anchura de dos metros. En la figura 9 se puede observar el modelo representado en la EHE para esta tipología.

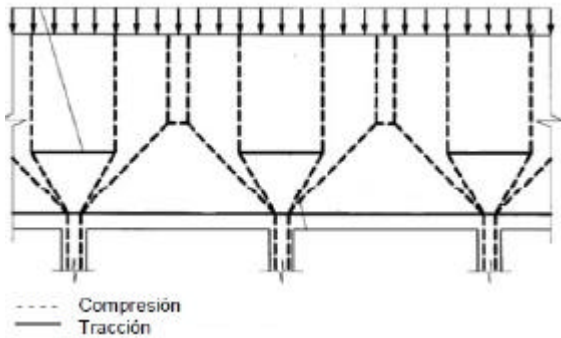


Fig. 9: Modelo de bielas y tirantes para viga de múltiples vanos.

La sección más restrictiva se sitúa en el apoyo, donde la EHE -08 plantea el cálculo de la cuantía de acero mediante la siguiente ecuación:

$$T_{2d} = 0,20P_d l = A_s f_{yd} \quad (2)$$

Donde f_{yd} está limitada a N/mm^2 .

$$P_d = 1,35P_p + P' \quad (3)$$

$$P_d = 1,35 \cdot (2,5 \cdot 2,5 \cdot 1) + 111,40 = 119,84 \text{ Tn/m}$$

La luz del vano es, como ya se ha indicado, 3,71 m. De la ecuación (2) se tiene que:

$$T_{2d} = 0,20 \cdot 119,84 \cdot 3,71 = 88,9 \text{ Tn} \quad (4)$$

$A_s = 25,33 \text{ cm}^2$ en dos metros de ancho

Por lo tanto, para disponer esta cuantía en los dos metros de ancho de la viga de atado, es necesario colocar barras $\varnothing 16$ cada 15cm.

Por otra parte, para el armado en el sentido perpendicular al muelle, se considera una viga de dos metros de ancho (al igual que en el cálculo anterior) con separación entre vanos de 3,71m. Esta viga estará sometida a las acciones de peso propio y a la acción de la pata de la grúa, que en este caso es una carga puntual aplicada, de lado de la seguridad, en el centro del vano, y de valor:

$$P = 111,40 \cdot 2 \rightarrow P = 228,8 \text{ Tn (ya mayorada)}$$

Por tanto, se analizan dos modelos diferentes, uno para obtener la tensión de tracción de la armadura debida al peso propio (carga lineal repartida), y otro para obtener dicha tensión debida a la carga de la grúa (carga puntual).

En el caso del peso propio, el modelo es similar al indicado en el sentido paralelo al muelle, con:

$$P_d = 1,35P_p \quad (5)$$

$$P_d = 1,35 \cdot (2,5 \cdot 2,5 \cdot 1) = 8,44 \text{ Tn/m}$$

Utilizando la ecuación (2) se tiene que:

$$T_{2d,1} = 0,20 \cdot 8,44 \cdot 3,71 = 6,26 \text{ Tn}$$

Paralelamente, en el caso de la pata de grúa el modelo empleado es el presentado en figura 10.

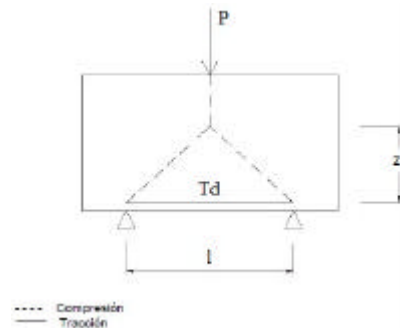


Fig. 10: Modelo de bielas y tirantes para carga puntual

Con,

$$T_d = 0,42P \quad (6)$$

$$z = 0,6 \cdot l \quad (7)$$

Se tiene $P = 222,8 \text{ Tn}$, luego:

$$T_{2d,2} = 0,42 \cdot 222,8 \text{ Tn} = 93,58 \text{ Tn}$$

Finalmente, se tiene que la tensión de tracción total es:

$$T_{2d} = T_{2d,1} + T_{2d,2} = 6,26 + 93,58 = 99,84 \text{ Tn}$$

Pero como f_{yd} está limitada 400 N/mm^2 , utilizando la ecuación (2):

$$A_s = 24,96 \text{ cm}^2 \text{ en dos metros de ancho.}$$

Esta cuantía equivale a barras $\varnothing 16$ cada 15 cm.

Además del armado paralelo y perpendicular al muelle, es recomendable proyectar un armado de cortante en la zona donde se produzcan los máximos esfuerzos de este tipo, es decir, bajo la pata de la grúa. Debido a la movilidad de esta carga, este armado deberá proyectarse en toda la longitud de la viga de atado.

En la figura 11 se observa el esquema de armado de la viga de atado.

7.5 Viga de junta entre cajones

Como se indicó anteriormente, la viga de junta será el elemento estructural encargado de aminorar los efectos de los asientos diferenciales entre cajones. Su inclusión en este documento se debe a que este elemento se sitúa dentro de la viga de atado, por lo que incide directamente en su geometría, sistema de encofrado y proceso constructivo.

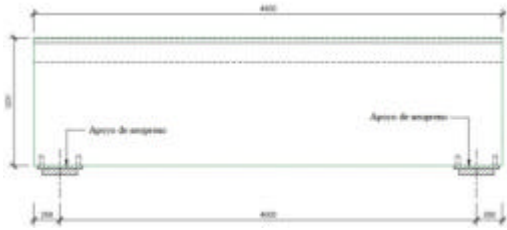


Fig. 14: Alzado viga de junta entre cajones.

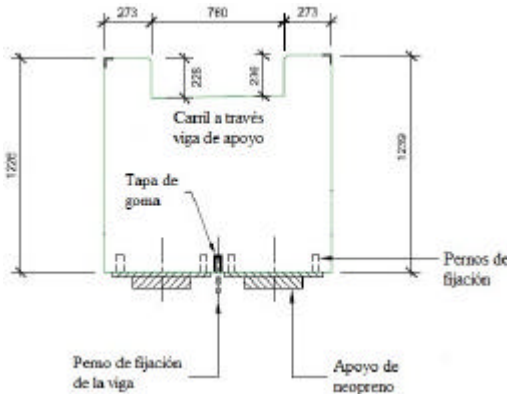


Fig. 15: Sección viga de junta entre cajones.

En cuanto al método de cálculo de la viga de junta, se propone utilizar el Método de los Estados Límite, recogido en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Las comprobaciones a realizar para garantizar la seguridad estructural serán:

- E.L.U. Agotamiento de las secciones frente a solicitaciones normales.
- E.L.U. Agotamiento de las secciones sometidas a esfuerzo cortante.
- E.L.S. de fisuración.

El elemento analizado es una viga de hormigón armado de 130 x 100 cm² de sección y luz entre ejes de apoyo de 4,00 m. Esta sección estará sometida a las acciones de la grúa de movilidad restringida, cuyas características ya han sido señaladas, y a su peso propio. En la tabla III se resumen los valores de estas acciones.

Naturaleza	Valor	γ_c	Acción mayorada
Peso propio	32,50 KN/ml	1,35	43,875 KN/ml
Grúa	4 x 733 KN	1,50*	4 x 1100 KN
Efecto dinámico grúa	4 x 1100 KN	0,15	4 x 165 KN

* El coeficiente de 1,50 podría ser corregido en función del fabricante de la grúa.

Tabla III: Acciones sobre la viga de junta entre cajones.

A continuación, en la figura 16 y 17 se representan las hipótesis planteadas para la

determinación de los esfuerzos máximos de flexión y cortante.

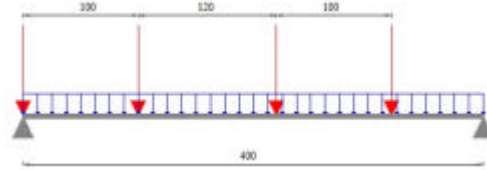


Fig. 16: Hipótesis 1: Cargas de la grúa próximas al extremo del vano.

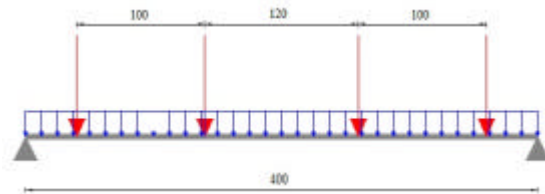


Fig. 17: Hipótesis 2: Cargas de la grúa centradas en el vano.

Luego de analizar ambas hipótesis se obtienen los esfuerzos máximos en flexión y cortante, como se indica en la tabla IV.

Hipótesis	Momento máximo (mKN)	Cortante máximo (KN)
1	2471	3121
2	2365	2618

Tabla IV: Esfuerzos máximos en la viga de junta entre cajones.

La armadura necesaria para E.L.U. a flexión viene determinada por el momento máximo de diseño, $M_{ed} = 2470$ mKN. Así, el armado inferior (tracción) es de 64,6 cm² y se disponen 14Ø25 equivalentes a 68,87 cm². En tanto, el armado superior (compresión) no es necesario, por lo que se dispone una cuantía mínima correspondiente al 30% de la cuantía mínima de la cara traccionada. Esto es $(130 \times 100) \times 2,8 \times 0,3/1000 = 10,92$ cm² y se disponen 12 Ø 12 equivalentes a 13,56 cm²

Por otra parte, la armadura necesaria para E.L.U. a cortante viene determinada por el esfuerzo cortante correspondiente a una distancia horizontal de un canto útil medida desde el apoyo, esto es 0,95 m. Así, $V_{ed} = 1841$ KN. Con este valor es necesario disponer 41,9 cm²/m. De manera más simple, se colocarán 8 ramas de Ø 12 cada 20 cm.

Finalmente, la armadura para E.L.S. de fisuración se determina a partir de la abertura de fisura para el momento producido por la combinación de acciones cuasi permanentes, tomándose un coeficiente de simultaneidad para la sobrecarga de la grúa de 0,5. Así, en la tabla V se

presentan los valores de los esfuerzos obtenidos en el punto $x = 2,20$ (M_{max}).

Naturaleza	Carga	Esfuerzo
Peso propio	32,50 KN/ml	64,4 mKN
Grúa	4 x 1265 KN	0,5 x 1665 mKN
Total		897 mKN

Tabla V: Esfuerzos para determinar el armado necesario en E.L.S. de fisuración.

La abertura máxima de fisura para la exposición ambiental considerada ($IIIc+Qb$) es de 0,1 mm. Debido a la cuantía de acero necesaria para satisfacer el E.L.S. de fisuración, el armado longitudinal se encuentra determinado por el cálculo de la fisura, por lo que la viga de junta se armará de acuerdo a este esquema, como se observa en la figura 18 y 19.

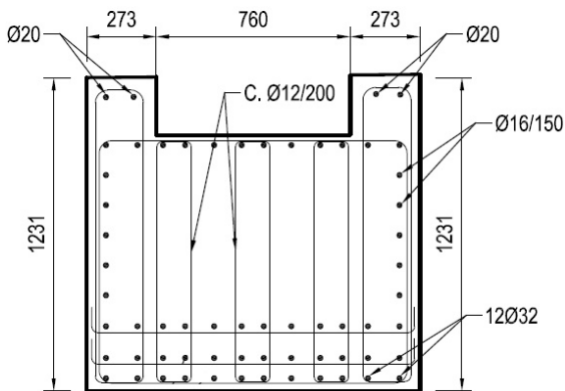


Fig. 18: Esquema de armado transversal viga de junta entre cajones.

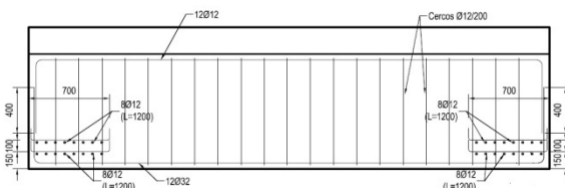


Fig. 19 Esquema de armado longitudinal viga de junta entre cajones.

8. Proceso constructivo

En este apartado se presenta un proceso constructivo recurrente para este tipo de vigas, el cual refleja la secuencia de acciones que se deben seguir para garantizar su correcta ejecución; no obstante, puede que existan determinadas acciones que respondan a los requerimientos de cada proyecto en particular y que no se recojan en el proceso presentado.

El proceso presentado corresponde a la viga de atado en estudio, el cual se puede utilizar como referencia, ya que involucra diversos aspectos de interés.

El proceso constructivo es el siguiente:

- Retirada de arena de relleno de celdas.
- Demolición de las paredes de los cajones en la zona de juntas.
- Ejecución de la viga de atado:
 - Colocación del carro de encofrado.
 - Disposición de armaduras.
 - Disposición de encofrados para fosos, arquetas, cajeados, etc.
 - Colocación de protectores de esquinas, pernos de anclaje, pates y cualquier otro elemento auxiliar que quede embebido en el hormigón.
 - Colocación de las conducciones que discurren por el interior de la viga cantil.
 - Hormigonado.
- Fabricación de vigas de unión entre cajones.
- Colocación de vigas de unión entre cajones.
- Colocación de bolardos.
- Colocación de defensas.
- Colocación de tapas de arquetas y remates.

Previamente a la construcción de la viga cantil, se comienza la obra con los trabajos de retirada de parte del material granular de relleno de las celdas. Dado que la viga de atado discurre sobre las dos hileras de celdas del lado mar de los cajones, la extracción del material granular de relleno se hará en éstas hileras solamente y hasta una profundidad de un metro bajo la cota de coronación de los cajones (en este caso +1,50 m).

La demolición de las paredes de los cajones en la zona de juntas entre ellos, necesaria para la ejecución del foso que alojará las vigas de junta entre cajones, debe alcanzar la cota +1,10 m, como se puede ver en la figura 19. Esta demolición incluirá el picado del hormigón y el corte de armaduras.

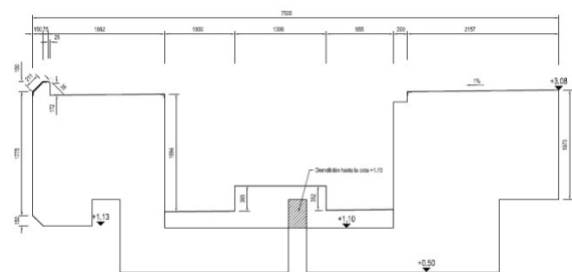


Fig. 20: Sección viga de atado por junta de cajones.

En cuanto a la viga de atado, su ejecución se hará por tramos con ayuda del carro de encofrado. La secuencia de ejecución de la viga comienza con la regularización de la superficie para facilitar la rodadura del carro y la colocación de armaduras. Las

armaduras proyectadas dentro de las celdas del cajón flotante estarán compuestas por una malla de barras corrugadas de Ø16 cada 150 mm, dejando esperas de 720 mm en la parte superior. Asimismo, la armadura de la viga de atado estará compuesta por una armadura de piel con una malla de Ø16 cada 150 mm. La armadura de cortante, compuesta por dos hileras de mallas de 24 Ø12 cada 200 mm, estará ubicada en el centro de la viga.

Por otra parte, se deben tener presentes los encofrados de los elementos particulares de la superestructura. Estos serán: arquetas de toma de agua, de toma eléctrica, de instrumentación, para alimentación de la grúa, para el cajado del carril y de los cables de la grúa. Se tendrá especial cuidado en fijar bien estos encofrados para evitar su flotación en el momento del hormigonado. También se tendrá en cuenta la colocación de las placas superiores para cumplir con el perfil requerido en la coronación de la viga de atado, además de la colocación de protectores de esquinas, pernos de anclaje para los apoyos de viga de unión y bolardos, tubos de drenaje y cualquier otro elemento auxiliar que deba quedar embebido en el hormigón.

Una vez colocado todo tipo de encofrados, armaduras y elementos protectores, se procede al vertido de hormigón en toda la longitud del carro, dejando un acabado superficial atalachado o con llana, los cuales se realizan manualmente.

Una vez vertido el hormigón, se esperará a que comience el fraguado para realizar el proceso de curado mediante la aplicación de productos apropiados para este fin.

Transcurridos los días necesarios para garantizar un nivel de resistencia especificado en proyecto, es posible posicionar las vigas de unión entre cajones, previamente fabricadas en un parque instalado en obra o un parque externo. Este posicionamiento se realizará con la ayuda de una grúa de capacidad suficiente. Al realizar esta maniobra, se debe colocar la viga procurando insertar los pernos de conexión, que se han dejado embebidos en el hormigón del apoyo, en el espacio correspondiente ubicado en los dos extremos de las vigas.

A su vez, los bolardos se colocaran sobre los pernos de conexión embebidos en el hormigón. En cuanto a los pernos de las defensas, éstos se conectarán a la superestructura realizando taladros en la viga, y fijándolos mediante aplicación de una resina epoxi adecuada.

9. Criterios y recomendaciones de ejecución

Los proyectos de vigas de atado en muelles de cajones flotantes han sido una fuente de constantes inconvenientes. En este apartado se entregan algunos criterios, recomendaciones o buenas prácticas que

pueden ser de gran utilidad en la fase de ejecución de vigas de atado y, así, ayudar a garantizar la correcta materialización de la superestructura.

A continuación, se determinan algunos de los criterios principales que se pueden tener en cuenta a la hora de realizar la obra.

- Hormigonado de la viga de atado en dos fases: se ha observado que, en los casos en que se tenga poca armadura respecto del canto de la viga de atado (en este caso 2,50 m), las armaduras de construcción que soportarán a la armadura superior, pueden sufrir pandeo a la espera del hormigonado, debido a su gran longitud y su falta de apeos. En tal caso es recomendable realizar un hormigonado en dos fases, la primera desde la cota de retiro de material granular (en este caso +0,50 m) hasta la cota de coronación de los cajones (en este caso +1,50 m) y, la segunda, desde ésta cota hasta la cota de coronación de la viga de atado, la cual será variable debido a la pendiente para evacuar las aguas. Así, luego de finalizada la primera fase, las armaduras de construcción quedarán a la espera de la armadura de la viga, siendo necesario su grifado para el traslado del carro desde el módulo hormigonado hasta el nuevo módulo a hormigonar. Una vez posicionado el carro, se procederá al desgrifado de la armadura de construcción y su empalme con la armadura de la viga de atado, procurando dejar los solapes pertinentes. Se recomienda que el grifado se realice como mínimo 5 días después de hormigonada la primera fase.
- Los pernos de anclaje de las defensas a la viga de atado, se realiza por taladros una vez hormigonada la viga. Estos trabajos podrán realizarse desde una embarcación auxiliar, montando andamios en el cantil del cajón o con operarios colgados en cestas mediante una grúa situada en el muelle. No obstante, estos pernos también pueden dejarse embebido en el hormigón; sin embargo, esto dificulta el diseño de carro de encofrado, ya que altera su continuidad en la cara de la viga que enfrenta al mar.
- Debido a la poca o nula distancia entre la viga de atado y el mar, el proceso constructivo puede verse afectado considerablemente por factores meteorológicos, como el oleaje, el viento o la marea. Por esta razón, es importante tomar las precauciones necesarias para llevar a cabo correctamente la ejecución de la obra, ya sea modificando determinadas acciones o, directamente, suspendiendo las faenas cuando, por ejemplo, las condiciones de oleaje no permitan el hormigonado.

- Como se ha comentado en el apartado 6, en ocasiones, el carro de encofrado puede presentar problemas de estanqueidad. Este inconveniente puede generar graves problemas en presencia de marea llanante o fuerte oleaje, ya que se permitiría el ingreso de agua de mar (con alto contenido de cloruros) a la mezcla de hormigón fresco. Claramente, esta problemática está íntimamente relacionada con los factores meteorológicos de los que se hacía referencia en el punto anterior.
- Dadas las grandes dimensiones de hormigón expuestas a los agentes climáticos, es recomendable que en el proceso de curado esta superficie se cubra con algún material (por ejemplo plástico) para protegerla y evitar la pérdida excesiva de agua por evaporación, lo que puede originar la aparición de fisuras superficiales.

Las recomendaciones presentadas corresponden a un determinado contexto de factores, los cuales se cree que son recurrentes en este tipo de obras; no obstante, como ya se ha indicado, es probable que en determinado proyecto se esté en presencia de otro tipo de factores que pueden generar inconvenientes no previstos.

10. Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este documento se ha podido determinar la importancia de las vigas de atado en muelles de cajones flotantes, identificando los factores de mayor incidencia, tanto en su sección como en sus características estructurales, sus requerimientos de diseño y ejecución, así como su proceso constructivo. Con esta información, ha sido posible plantear algunas recomendaciones que guardan relación con su proceso de análisis y ejecución. Sin embargo, este planteamiento responde a la línea "clásica" de diseño y construcción de vigas de atado en muelles de cajones flotantes, es decir, las ideas plasmadas en este documento nacen de la práctica habitual observada en este tipo de obras.

A partir de esta idea es posible plantear una conclusión que tiene relación con las directrices a seguir en el diseño y ejecución de esta clase de vigas y que apunta al desarrollo de nuevos materiales y tecnologías.

Dicho esto, si se observan las cuantías de armadura pasiva y su distribución dentro de la sección tipo de la viga, se ve que son bastante reducidas en relación a su gran canto, como ya se ha comentado en el apartado 9. Por otra parte, dada la cantidad de cajeados y superficie expuesta de la viga, es posible inferir que gran parte de la armadura presentada en los esquemas, responde a fenómenos de fisuración. Con estas dos ideas en mente, es

coherente reflexionar sobre el desempeño del hormigón armado en estas estructuras. Teniendo el fenómeno de la fisuración como factor preponderante, el hormigón con fibras aparece como una respuesta idónea. Su excelente comportamiento ante esta patología es su característica principal, además de que las fibras confieren al hormigón una mejor respuesta frente a fenómenos que son de gran interés en obras marítimas: durabilidad (ambiente agresivo) e impacto (de embarcaciones). Debido a esto el hormigón con fibras sería una inmejorable solución para materializar una viga de atado.

Si se observan las luces de cálculo consideradas en la determinación de la armadura, se ve que éstas no son elevadas (3,71 m), por lo que las fibras podrían absorber sin problemas los momentos flectores inducidos por las cargas aplicadas, así como los esfuerzos cortantes. Y para los elevados esfuerzos de compresión, inducidos por las grúas, estará el hormigón, como siempre.

A pesar de lo anterior, el diseño estructural, como disciplina, ha sido bastante reacio a proyectar elementos de gran importancia estructural en hormigón con fibras, salvo aquellos en los que el buen desempeño de este material está demostrado por la experiencia (p.e. revestimiento de túneles). No obstante, en algunos casos puede que el hormigón con fibras no presente las características resistentes suficientes, para lo cual se puede reforzar con barras corrugadas; sin embargo, esta técnica aún se encuentra en fase de estudio por lo que su aplicación es nula.

Además de la desconfianza estructural que se le tiene al hormigón con fibras, está el elevado costo asociado a su aplicación, lo que hace que en muchos proyectos se prefiera el hormigón armado, y la falta de normativa que coarta a los proyectistas al momento de su utilización como elemento estructural.

Otra conclusión obtenida de la realización de esta investigación es la falta de documentación técnica referente a la superestructura de muelles de gravedad. Si bien, Puertos del Estado ha elaborado algunos documentos donde se toca este tema, la información que se puede encontrar es bastante superficial y escueta. Dada la inversión que implica este tipo de obras y su trascendencia en el desarrollo de un país, la información técnica es de suma importancia para que cada proyecto se ejecute de la mejor manera posible. Aunque esta carencia de información tiene su razón de ser en el carácter heterogéneo de este tipo de obras, se cree que actualmente se poseen conocimientos empíricos suficientes como para plasmarlos en recomendaciones de diseño y ejecución, por ejemplo. De esta manera, este documento intenta ser un punto de partida para lograr este objetivo.

Agradecimientos

Se quiere agradecer a las personas que han ayudado a la elaboración de este documento, tanto a los profesores como a los técnicos de obra que han colaborado en la resolución de dudas a lo largo de la investigación y nos han dado el privilegio de visitar una obra de esta tipología.

Referencias

- [1] J.A. Jiménez. Geotécnia y Cimientos III, Segunda Parte. Rueda, Madrid 1980, pp. 1823-1864.
- [2] G.P. Tsinker. Port Engineering. John Wiley & Sons, New Jersey 2004, pp. 519-531.
- [3] Ministerio de Fomento de España-Puertos del Estado. Manual para el Diseño y la Ejecución de Cajones Flotantes de Hormigón Armado para Obras Portuarias, Organismo Público Puertos del Estado, Madrid 2006.
- [4] Gobierno de España-Ministerio de Fomento-Puertos del Estado. Guía de Buenas Prácticas para la Ejecución de Obras Marítimas, Puertos del Estado, Madrid 2008.
- [5] M.P. Alaejos, M.A. Bermúdez, J.I. Grau, “Investigación y recomendaciones para la construcción de cajones portuarios de hormigón armado”, CEDEX-Puertos del Estado, Puertos, nº136, Octubre 2006.