

MÁSTER UNIVERSITARIO EN NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***APROVECHAMIENTO DE CAJÓN
FLOTANTE DE HORMIGÓN, MEDIANTE
SU REFLOTE, TRASLADO Y FONDEO EN
EL PUERTO DE BILBAO***

Alumno/Alumna	<i>López, Bengoa, Leire</i>
Director/Directora	<i>Martínez, Lozares, Aitor Tomás</i>
Departamento	Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales
Curso académico	<i>2020/2021</i>

Bilbao, marzo, 2021

ÍNDICE

ÍNDICE	I
FIGURAS UTILIZADAS	II
RESUMEN	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTADO DEL ARTE	1
1.2. OBJETIVOS	2
2. CAJONES FLOTANTES DE HORMIGÓN	3
2.1. INFORMACIÓN SOBRE EL CAJÓN FLOTANTE “ALFA”	7
2.2. LA ESTABILIDAD EN EL CAJÓN FLOTANTE DE HORMIGÓN	10
3. PROCESO DE REFLOTE DEL CAJÓN FLOTANTE “ALFA”	15
4. SELECCIÓN DE REMOLCADOR PARA EL TRASLADO Y TREN DE REMOLQUE	21
5. PLAN DE NAVEGACIÓN	25
5.1. DERROTA EN LA CARTA NÁUTICA DEL PUERTO DE BILBAO	27
5.2. REGLAMENTACIÓN PARA EL TRASLADO	30
6. PROCESO DE FONDEO DEL CAJÓN FLOTANTE	35
7. INCONVENIENTES ENCONTRADOS	41
8. CONCLUSIONES	43
9. BIBLIOGRAFÍA	45

FIGURAS UTILIZADAS

Figura 2.1: Ejemplo de cajón flotante de hormigón en planta [1]	3
Figura 2.2: Sección transversal de cajón flotante [1].....	4
Figura 2.3: Construcción de cajón en dique flotante [2].....	5
Figura 2.4: Buque de hormigón SS Selma [3]	6
Figura 2.5: Plano en planta del cajón “ALFA” [4]	7
Figura 2.6: Plano en alzado del cajón “ALFA” [4].....	8
Figura 2.7: Dimensiones del cajón “ALFA” [4].....	8
Figura 2.8: Configuración grupos de celdas cajón “ALFA” [4]	9
Figura 2.9: Condición de equilibrio de un cajón en flotación [5].....	10
Figura 2.10: Cajón flotante con una escora ϕ [5].....	11
Figura 2.11: Aumento de manga al escorar [6].....	12
Figura 3.1: Ubicación del cajón y zona de vertido del material [4].....	15
Figura 3.2: Características gánguil “Punta lucero” [8]	16
Figura 3.3: Ganguil “Punta Lucero” [12].....	16
Figura 3.4: Extracción del material de las celdas [4].....	17
Figura 3.5: Grúa desde tierra para extracción de material [12]	18
Figura 3.6: Submarinista en la jaula preparado para bajar a la celda [4].....	19
Figura 4.1: Características de los remolcadores [9].....	21
Figura 4.2: Diagrama vectorial de empuje para distintos tipos de remolcador ($V_{WT} = V_S$) [6]	22
Figura 4.3: Configuración del remolque [4]	23
Figura 5.1: Previsión de la altura del oleaje en el interior del puerto [10].....	25
Figura 5.2: Previsión de la corriente marina en el interior del puerto [10].....	26
Figura 5.3: Inicio de la derrota para el traslado [12].....	27
Figura 5.4: Derrota completa del traslado [12].....	28
Figura 5.5: Llegada a Punta Ceballos [12].....	29
Figura 5.6: Situación final del cajón en Punta Ceballos [12].....	29

Figura 5.7: Regla 24. Abarloado. Menor de 50 metros. [11].....	33
Figura 6.1: Cajón apoyado en el enrase [4]	35
Figura 6.2: Configuración pértiga [4]	36
Figura 6.3: Sondeo situación final del cajón en Punta Ceballos [4]	37
Figura 6.4: Plano vertido cuadrículas [4].....	38
Figura 6.5: Gánguil vertiendo el material para preparar la base del cajón [4].....	38
Figura 6.6: El cajón momentos antes de llegar a su posición final [4]	39
Figura 6.7: Cajón fondeado en su posición final [4].....	40

RESUMEN

La obra portuaria, como otros ámbitos portuarios, puede y debe adaptarse para economizar su desarrollo. El ente público empresarial Puertos del Estado es el que tiene el cometido de fomentarlo a las Autoridades Portuarias de cada puerto español. El aprovechamiento del cajón flotante de este trabajo es un claro ejemplo. El cual estaba colocado ya en un muelle del Puerto de Bilbao y se traslada con el propósito de aumentar un pantalán de este mismo puerto. Pudiendo así evitar una construcción únicamente para el aumento, que sería más costosa. Pero esta operación presenta dificultades tanto para la parte de la Autoridad Portuaria (por organizarla siendo tan poco habitual) como por la parte contratada que interviene con equipos marítimos. Ya que se necesita la correcta adaptación de una estructura que no estaba construida para este fin.

LABURPENA

Portuko obra, portuko beste eremu batzuk bezala, egokitu daiteke eta egokitu behar du bere garapena ekonomizatzeko. Erakunde publiko eta empresariala “Puertos del Estado”, Espainiako portu bakoitzeko Portu Agintaritzei hori sustatzeko eginkizuna du. Lan honetako tiradera flotatzailearen aprobetxamendua adibide argia da. Bilboko portuko kai batean jarrita zegoen eta portu honetako pantalan bat handitzeko asmoz lekualdatu da. Horrela, eraikuntza bat egitea bakarrik handitzeko saihestu daiteke. Baina eragiketa honek zailtasunak ditu, bai Portuko Agintaritzarentzat (ez delako oso ohikoa antolatzea) bai itsas ekipoekin lan egiten duen kontratatutako partaidearentzat. Proposamen honetarako egin ez den egitura egokitu behar delako.

ABSTRACT

The harbour works, as in other field of harbours, they can and should adapt for save their development. The state organization 'Puertos del Estado' is which has to encourage to port authorities of each Spanish port. Taking advantage of this thesis' floating structure, is a good example. Which was already placed on a Bilbao Ports' dock and it has been moved with the purpose of increasing another dock in this port. In this way it can avoid building new one just for the increase, that it would be more expensive. But this operation presents difficulties as for Port Authority (due to its part on the organization in this unusual work) as for the part hired which works with maritime equipment. Because it's necessary the correct adjustment of a structure that was not made for this purpose.

PALABRAS CLAVE

Cajón flotante, reflote, fondeo, remolque y traslado.

1. INTRODUCCIÓN

Las primeras obras con cajones que se construyeron en España fueron en el muelle de Levante en el Puerto de Huelva. En el año 1932 con 8 metros de calado máximo. En décadas posteriores se aplicó esta técnica en más puertos españoles como Pasajes, Avilés, Gijón, Cádiz o Cartagena. Durante la década de los 90 su uso se extiende a la construcción de diques verticales llegándose en los últimos años a los 26 metros de calado en los cajones del dique Reina Sofía de Las Palmas o a los 28 en el dique de la dársena de Escombreras, en Cartagena. Situándose entre los países más avanzados en la construcción y en el uso de cajones flotantes de hormigón armado.

Normalmente estos cajones se construyen en el propio puerto en el que van a ser fondeados e instalados muy cerca de la infraestructura portuaria a la que van a formar parte. Mediante diques flotantes también llamados cajoneros. Se crean para un propósito determinado y luego se trasladan a su posición definitiva. De manera poco habitual, algunos cajones que ya están instalados se preparan para su reflote, traslado y posterior fondeo. Para formar parte de otra infraestructura de nuevo.

Por lo que el trabajo recopila información sobre este interesante proceso en el que se necesitan para su resolución, equipos marítimos como el gánguil con retroexcavadora y el remolcador de puerto. Junto con la planificación y supervisión de la Autoridad Portuaria.

1.1. ESTADO DEL ARTE

La técnica de la construcción de cajones flotantes está muy desarrollada en España. Pero como se menciona en el trabajo, concretamente el aprovechamiento de un cajón flotante de hormigón ya utilizado no ha sido una labor demasiado habitual. Lo que supone, que no hay muchas publicaciones sobre este tema.

Afortunadamente el organismo público Puertos del Estado tiene publicado el *Manual para el diseño y la ejecución de cajones de hormigón armado en obras portuarias* (2006). El cual ha aportado al trabajo una información muy relevante sobre todo para el segundo capítulo sobre cuestiones relacionadas con la estabilidad de los cajones flotantes. También el libro *Aplicaciones de teoría del buque y construcción naval* (2017) ha sido muy útil ya que hay comportamientos en los buques que se asemejan a los de un cajón flotando y durante su navegación.

Sin olvidar la ayuda que han proporcionado, para distintos capítulos del trabajo, algunas tesis y trabajos de fin de carrera. Como, por ejemplo, el *Estudio hidrodinámico y diseño del remolque para un dique flotante de 10000 toneladas de desplazamiento* (2019).

1.2. OBJETIVOS

Este trabajo quiere dar a conocer cómo se puede aprovechar una estructura de obra portuaria que ha tenido uso desde su construcción, como parte de un muelle. Mostrando las distintas fases que se van realizando para conseguir darle un nuevo uso al cajón. Que es, el de formar parte de la ampliación de un pantalán, para proporcionar más seguridad en el atraque con condiciones meteorológicas adversas. Consiguiendo dar un través por proa.

El desarrollo del proceso va desde su reflote hasta su fondeo en su posición final. Sin olvidar la operativa del traslado. Viendo como toman parte en él, empresas del sector marítimo. Que van realizando las distintas actividades que marca la Autoridad Portuaria.

Su objetivo no es únicamente mostrar que ocurre en los distintos pasos, sino también explicar el porqué de ciertos procedimientos o elecciones que se han tomado. Y por supuesto los inconvenientes encontrados en este aprovechamiento poco común de un cajón flotante.

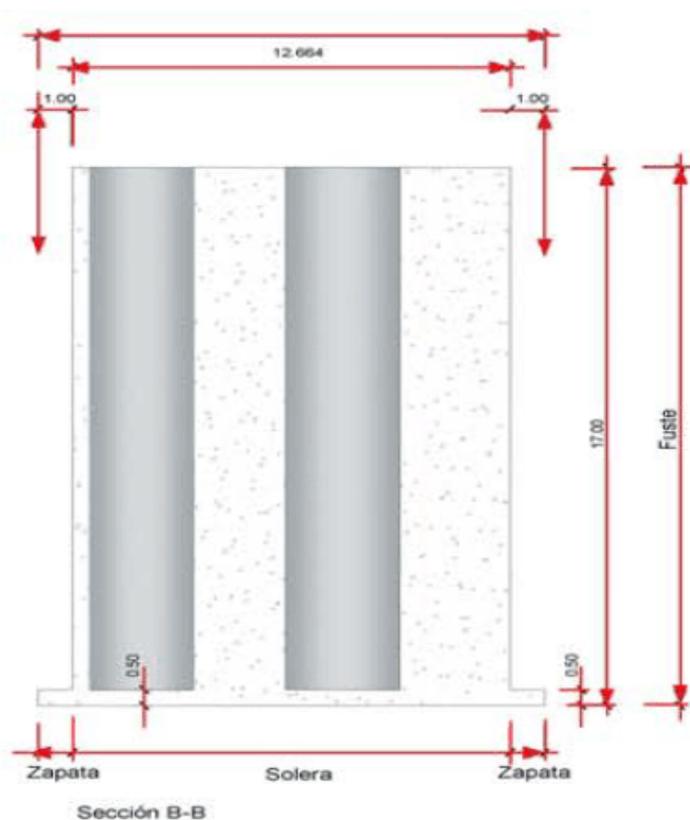


Figura 2.2: Sección transversal de cajón flotante [1]

Las infraestructuras de obra portuaria que utilizan este tipo de cajones son principalmente los muelles y diques de abrigo. Estos deberán proyectarse y construirse para que sean capaces de soportar todas las acciones que los puedan solicitar con un nivel de seguridad aceptable, tanto durante la construcción como durante su vida útil, así como la agresividad del ambiente.

El proceso constructivo más frecuente en España se basa en el empleo de encofrados deslizantes en dique flotante, que se hunde controladamente mediante lastrado de sus tanques a medida que progresa el deslizado del fuste de los cajones. Se asegura durante todo el proceso la estabilidad del conjunto, para lo cual también se procede al lastrado secuencial y controlado del cajón. Hoy es relativamente normal construir cajones en los diques flotantes con dimensiones en torno a los 60 metros de largo por 30 de ancho y por 35 de altura. [2]



Figura 2.3: Construcción de cajón en dique flotante [2]

Conocer verdaderamente su construcción conllevaría la explicación de un proceso mucho más amplio y detallado, pero no es el objeto de este trabajo proporcionar más información sobre este asunto.

Como vida útil de los cajones portuarios, para diques o muelles, se considerará como mínimo los valores consignados en la ROM 0.0 en función del índice de repercusión económica de la obra marítima (IRE), siempre y cuando no se trate de obras provisionales. Oscilará entre 50 años para obras de IRE alto y 15 años para obras de IRE bajo. Con carácter general, en este documento a los efectos del estado límite de servicio de pérdida de durabilidad de la estructura se considera que ésta es durable durante un periodo de servicio de 50 años, siempre que se cumplan las recomendaciones incluidas en el mismo referente a la resistencia del hormigón, su dosificación y los recubrimientos establecidos en él. [1]

De primeras resulta extraño que una estructura de hormigón del tamaño de los cajones flotantes pueda flotar. Incluso después de muchos años de servicio. Pero más sorprendente y curioso es que hace dos siglos se construyeron barcos de hormigón.

El primer barco de hormigón que salió a la mar fue el Liguria del italiano Carlo Gabellini en 1896. El nuevo siglo extendió esta práctica a Alemania, Gran Bretaña, Holanda,

los Estados Unidos de América o Noruega. Fue en este último país en donde en 1917 se botó el primer barco de hormigón destinado a cruzar el océano Atlántico, el Namsenfjord de Nicolay Fougner.

Durante la Primera Guerra Mundial, y ante la escasez generalizada de acero, el presidente de los Estados Unidos Woodrow Wilson aprobó la construcción de 24 buques de hormigón bajo el programa Emergency Fleet Corporation, pero la guerra llegó a su fin y aunque doce de los buques se encontraban en construcción, ninguno había sido acabado a tiempo. Una vez terminados, fueron vendidos a compañías privadas y destinados al transporte de cargas ligeras o almacenaje. Uno de estos fue el petrolero SS Selma. Tenía 130 metros de eslora y 7.500 toneladas de desplazamiento, el Selma es el buque de hormigón más grande jamás construido. El buque fue destinado al golfo de México para el transporte de crudo. [3]

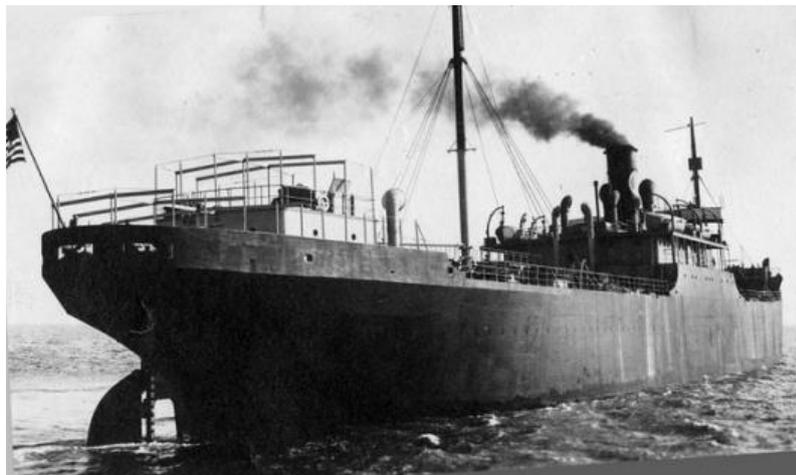


Figura 2.4: Buque de hormigón SS Selma [3]

2.1. INFORMACIÓN SOBRE EL CAJÓN FLOTANTE “ALFA”

A continuación, veremos datos técnicos del cajón “ALFA”. Son los datos reales del cajón sobre el que trata este trabajo.

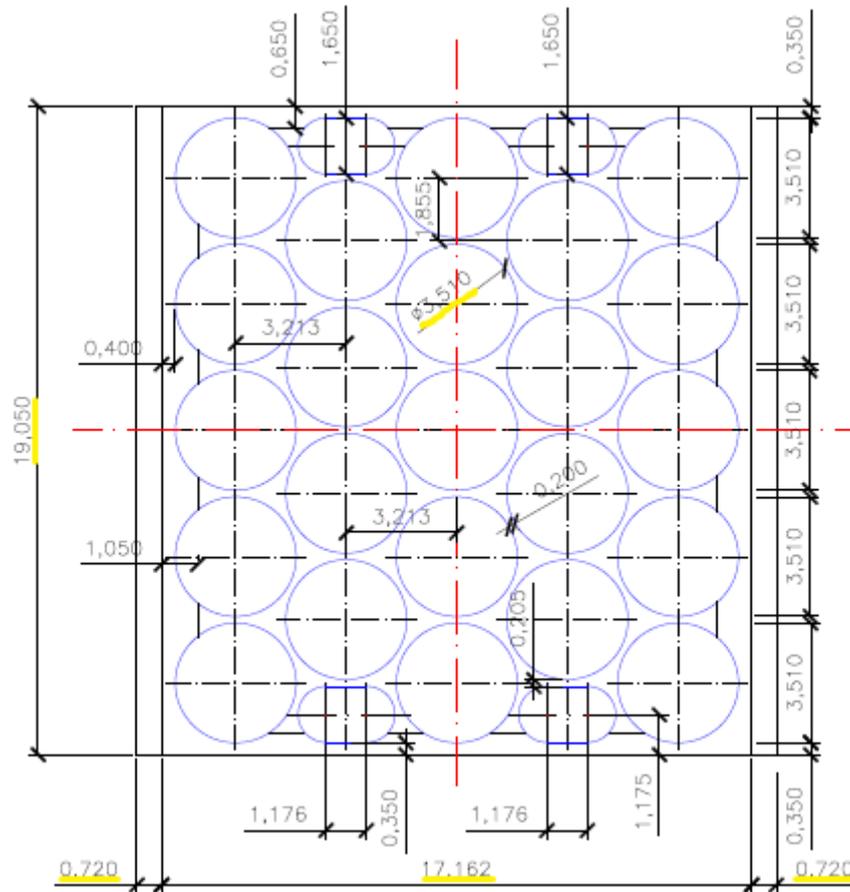


Figura 2.5: Plano en planta del cajón “ALFA” [4]

La solera, es decir, la superficie total en planta es de $354,37 \text{ m}^2$ (en este caso se incluye en la solera la superficie de las zapatas). La medida destacada en amarillo de 19,050 metros podría decirse que es el largo o eslora de este artefacto naval en navegación. Mientras que el ancho o manga es de 18,602 metros ($17,162 + 0,720 + 0,720$). El diámetro de las celdas circulares es de 3,510. El fuste de 24,100 metros queda subrayado en la siguiente figura.

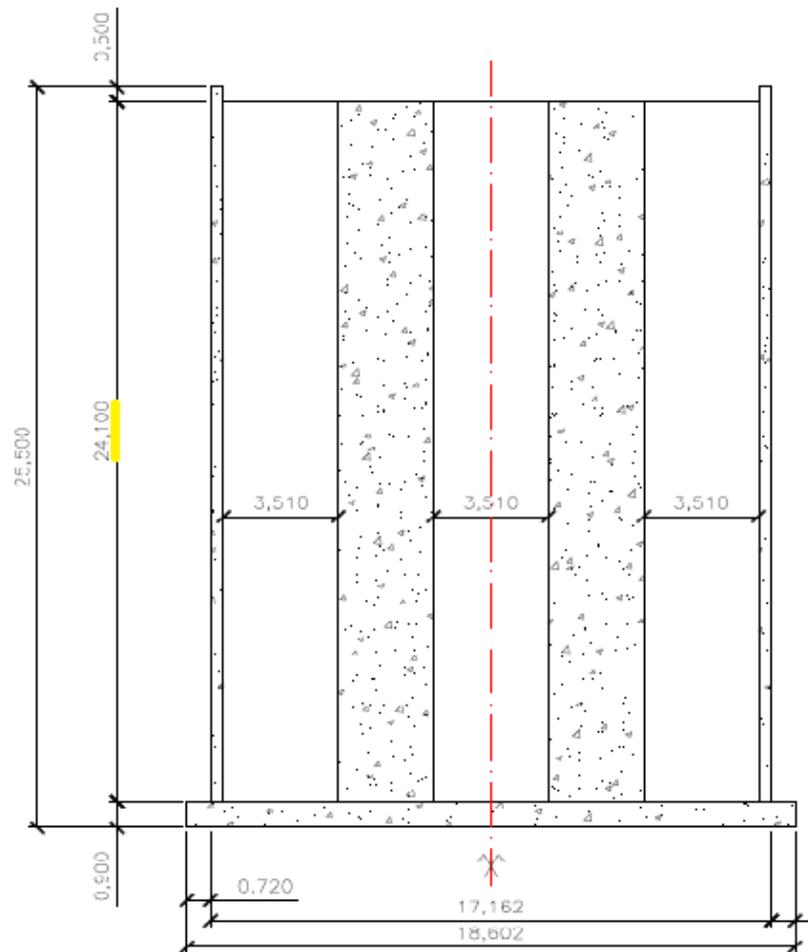


Figura 2.6: Plano en alzado del cajón “ALFA” [4]

Sus dimensiones son las siguientes:

DIMENSIONES	
Nº celdas circulares:	23 uds
Superficie celdas circulares:	9,676 m ² /celda
Nº celdas ovoidales:	4 uds
Superficie celdas ovoidales:	4,079 m ² /celda
Volumen estimado arena en celda circular:	226,42 m ³
Volumen estimado arena en celda ovoidal:	95,45 m ³
Volumen Total estimado arena en celdas:	5.589,42 m ³

Figura 2.7: Dimensiones del cajon “ALFA” [4]

El volumen total estimado de arena en las celdas del cajón sirve para calcular aproximadamente el tiempo que llevará la extracción del material. Un dato que tiene que ser facilitado a las empresas que liciten la actividad, para que calculen el tiempo que tardarán y comprobar si pueden cumplir con los plazos de finalización.

Este cajón concretamente dispone de comunicaciones entre celdas. Estas se encuentran a 1 metro de la solera en forma de tubo. Generándose así el fenómeno de los vasos comunicantes al ser llenadas, evitándose que se produzcan desniveles de agua importantes entre ellas comprometiendo la estabilidad de la estructura. No todas las celdas están comunicadas entre sí, se puede ver en la siguiente figura la configuración de los grupos de celdas que si están comunicados. Las celdas de color blanco no disponen de comunicación con otras. Se suelen tener incomunicadas celdas en los costados para corregir posibles escoras. [4]

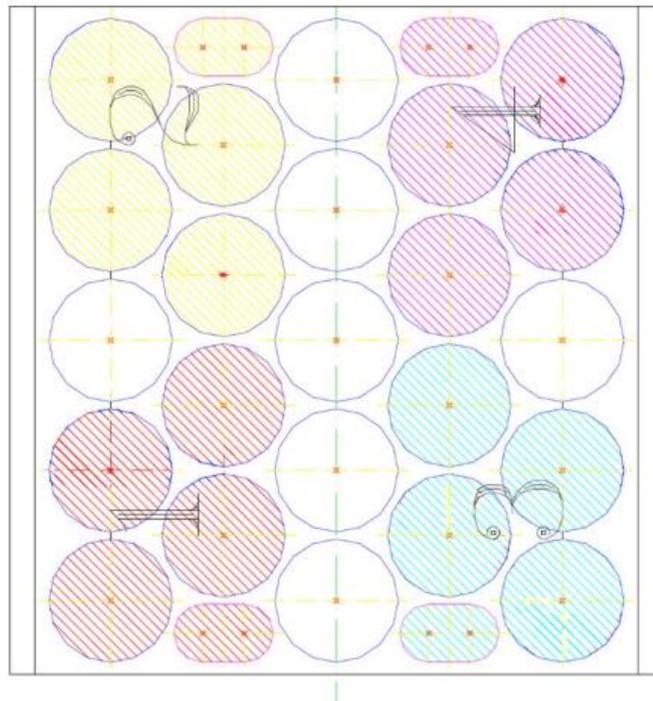


Figura 2.8: Configuración grupos de celdas cajón “ALFA” [4]

Con respecto al peso, el cajón vacío pesa 6124,30 toneladas. Pero con todas las celdas llenas de agua de mar tiene un peso de 11987,34 toneladas.

2.2. LA ESTABILIDAD EN EL CAJÓN FLOTANTE DE HORMIGÓN

El objetivo del dimensionado del cajón es buscar un equilibrio entre una suficiente flotación y una estabilidad mínima, para poder transportarlo flotando a su posición definitiva. Se puede definir la estabilidad de un buque o artefacto naval en este caso, a la capacidad de volver a su posición de adrizado cuando la ha perdido por la acción de alguna fuerza externa. Como el oleaje, el viento que incide en la obra muerta o un movimiento de un peso desplazado del eje longitudinal.

A efectos de estabilidad transversal estática, el cajón se comporta como un buque. La posición de equilibrio transversal del cajón ocurre cuando el centro de gravedad (G) y el centro de carena (c) se encuentran en la misma vertical. Siendo el desplazamiento y el empuje iguales y aplicados en G y c respectivamente. Se llama desplazamiento al peso total del artefacto naval, y es igual al peso del volumen de agua desplazada por su carena. Por otro lado, el empuje es la fuerza vertical y hacia arriba que experimenta todo objeto sumergido en un fluido e igual al peso del fluido desalojado.

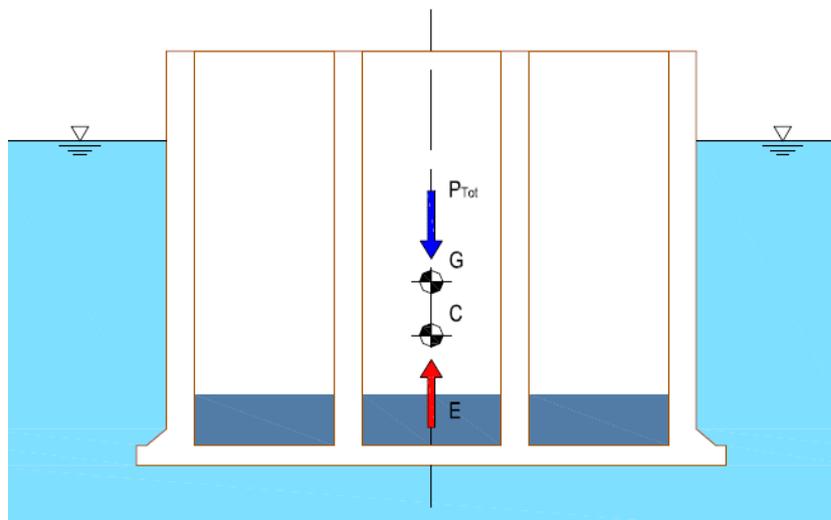


Figura 2.9: Condicion de equilibrio de un cajon en flotacion [5]

Si por la acción de alguna fuerza externa la estructura es escorada, el peso por supuesto no varía y sigue aplicado en G . El empuje también mantiene su valor pero c se desliza hasta

c_1 . Generandose así, un brazo adrizante (GZ) que hará volver a adrizar el cajón. Siempre que la altura metacéntrica (GM) sea positiva.

$$GZ = GM \cdot \text{sen } \varphi$$

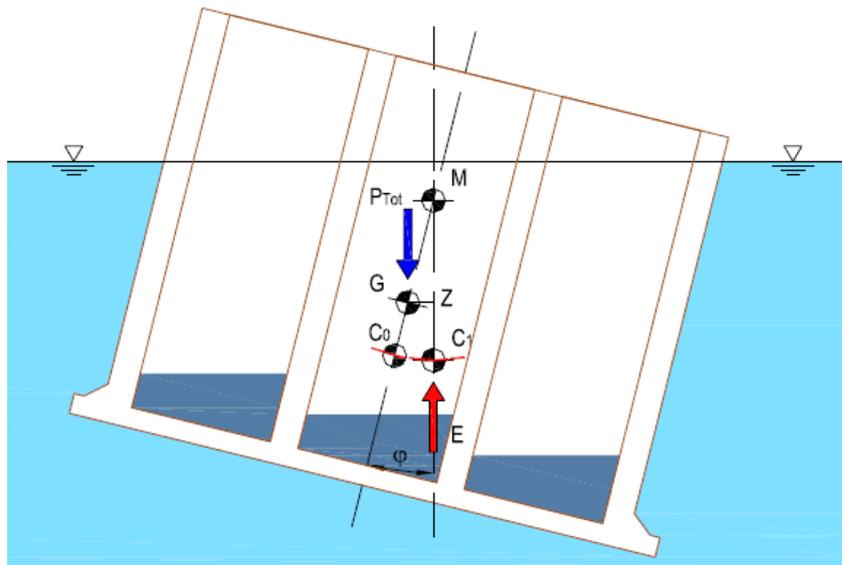


Figura 2.10: Cajon flotante con una escora φ [5]

Cuanto mayor sea el valor del GM , mayor será la capacidad en contra de ser volcado. Esto se consigue aumentando el lastre de las celdas. Pero se debe respetar un francobordo mínimo para asegurar la flotabilidad. Por cuestiones de seguridad, GM debe tener un valor mínimo de 0,30 metros en aguas abrigadas y 0,50 en aguas abiertas mientras el cajón se desplace. [1]

$$GM = KM - KG = Kc + cM - KG$$

La manga (M) tiene influencia en la estabilidad. Cualquier aumento de esta, provoca un aumento sustancial del radio metacéntrico (cM), siempre que el calado permanezca constante. Consecuentemente el GM aumenta. Se ve más claramente con la fórmula del cM .

$$cM = \frac{I}{V_c} = \frac{\frac{1}{12} \cdot E \cdot M^3}{E \cdot M \cdot C}$$

En los buques de paredes verticales la escora provoca un aumento de la manga, siempre que la línea de flotación no sobrepase la borda del buque. Se puede asemejar el cajón del trabajo a un buque de paredes verticales gracias a sus formas. En el caso (1) de la siguiente figura se puede ver como el buque adrizado tiene una manga m_0 que es menor a la m_1 al escorarse hasta la borda. Este aumento de la manga proporciona al buque un aumento del GM y por tanto, de la estabilidad transversal. Por lo que, como se puede comprobar en el caso (2) a mayor francobordo, mayor será la manga que alcance la estructura naval. Beneficiando así la estabilidad. [6]

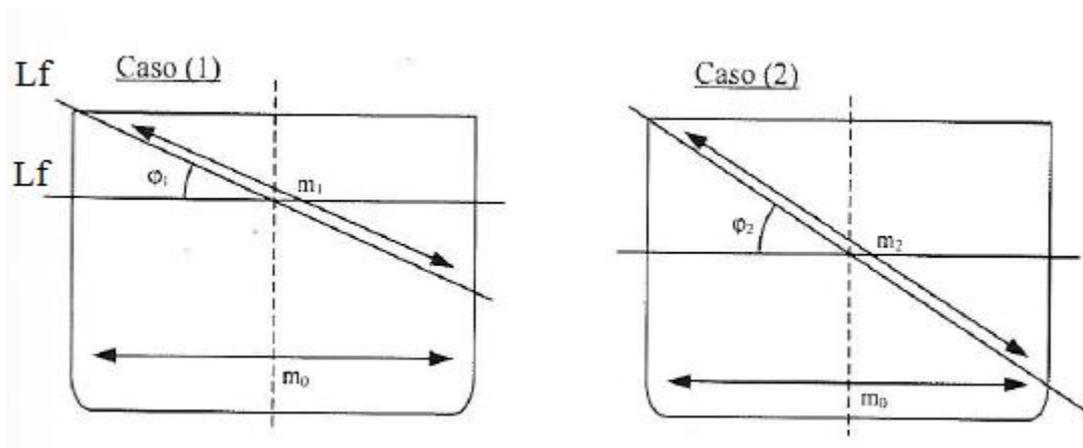


Figura 2.11: Aumento de manga al escorar [6]

A continuación, se calcula la estabilidad del cajón “ALFA” con todas sus celdas vacías. Es decir, la altura metacéntrica. Se conoce su desplazamiento en vacío y que flotará en agua salada. Por lo que el volumen de carena será igual al volumen de agua que desplaza. Las formas de esta estructura facilitan el cálculo.

$$V_c = E \cdot M \cdot C$$

$$\frac{D}{\gamma} = E \cdot M \cdot C$$

$$\frac{6124,30}{1,025} = 19,05 \cdot 17,16 \cdot C$$

$$C = 18,27 \text{ m}$$

$$Kc = \frac{C}{2} = \frac{18,27}{2} = 9,13 \text{ m}$$

$$cM = \frac{I}{V_c} = \frac{\frac{1}{12} \cdot E \cdot M^3}{E \cdot M \cdot C} = \frac{8021,68}{5972,42} = 1,34 \text{ m}$$

$$KG = 10,72 \text{ m (Tabla de momentos)}$$

$$GM = Kc + cM - KG$$

$$GM = 9,13 + 1,34 - 10,72 = -0,25 \text{ m}$$

En donde;

c = Centro de carena.

Kc = Distancia desde la base hasta el centro de carena (m).

cM = Radio metacéntrico transversal. Distancia desde el centro de carena al metacentro (m).

KG = Distancia desde la base hasta el centro de gravedad (m).

V_c = Volumen de carena (m³).

E = Eslora (m).

M = Manga (m).

C = Calado (m).

P = Puntal (m).

D = Desplazamiento en vacío (Tn).

γ = Densidad del agua de mar (Tn/m³).

I = Momento de inercia de la superficie de flotación (m⁴).

La altura metacéntrica del cajón en vacío no se encuentra entre los valores de seguridad. Incluso resulta negativa. Lo que quiere decir que su equilibrio es inestable. Si se le sometiera

a alguna fuerza escorante, volcaría. Por lo que, no puede navegar en esta condición. Para aumentar GM hay que lastrar sus celdas. [7] [12]

3. PROCESO DE REFLOTE DEL CAJÓN FLOTANTE “ALFA”

Lo primero que se realiza es la demolición de la superestructura. Para que deje de ser muelle. Quedando las celdas al descubierto y para que se pueda llevar a cabo la extracción del material. El material es mayormente arena con algunas piedras. El cajón formaba parte del muelle AZ-1 del Puerto de Bilbao. Por lo que se descarga el material cerca de su ubicación. En una zona delimitada.



Figura 3.1: Ubicación del cajón y zona de vertido del material [4]

El gánguil “Punta Lucero” que se encarga del trabajo tiene las siguientes características:

Características gánguil “Punta Lucero”
Tipo de buque: Gánguil
Eslora: 37 metros
Tonelaje: 249 GT
Cántara: 200 m ³
Propulsión: MAN convencional
Astillero: Astilleros Zamakona Bilbao
Propietario: BAM

Figura 3.2: Características gánguil “Punta Lucero” [8]



Figura 3.3: Gánguil “Punta Lucero” [12]

Tiene un depósito central a cielo abierto. Ese depósito está limitado por compuertas integradas en el casco. Manejadas por cadenas y cabrestantes, que cuando se abren descargan el material por gravedad. Encima del depósito tiene colocada una plataforma a la altura de la cubierta principal, en la que está la retroexcavadora amarrada con cadenas. Durante la extracción se posiciona mediante anclas y/o amarras a tierra si es posible.

La extracción la comenzó el gánguil vaciando las celdas del grupo 1, después el 2, el 4 y el 3. Además de las celdas más externas sin comunicación, que están entre los grupos 1-2, 2-4 y 3-4. Ya que es hasta donde alcanzaba la retroexcavadora del gánguil. En este primer paso todas estas celdas vaciadas un 40%. Ninguna ovoidal vaciada por el momento.



Figura 3.4: Extracción de material de las celdas [4]

Después de esto, una grúa colocada desde tierra con un cazo colgado desde su pluma, vació celdas al 100%. El material lo cargaba al gánguil para que este lo descargara en la zona de vertido. No todas las celdas las vació completamente la grúa, ya que no alcanzaba la más lejanas desde su posición. Y tuvo que venir una segunda grúa con más alcance para vaciar al 100% las restantes. Todas las ovoidales fueron vaciadas por el gánguil, pero con un cazo más pequeño. Por último, la unión entre el cajón del asunto y el contiguo fue eliminada mediante una retroexcavadora contratada por BAM.



Figura 3.5: Grúa desde tierra para extracción de material [12]

Para asegurar que no queda una cantidad importante de material en las celdas, se metió un submarinista en una jaula que bajaba colgada hasta el fondo de ellas. Lo más importante es comprobar que el tubo de comunicación entre celdas no esté obstruido por material. Para que no interrumpa el efecto de los vasos comunicantes. También se aprovecha para sacar video del estado del hormigón y buscar grietas. Después de un par de bajadas (de 24 metros) del submarinista en la jaula, decidieron que en las próximas bajadas lo haría sin jaula. Ya que la velocidad de bajada del submarinista es más recomendable que la regule el mismo en vez de la grúa que baja la jaula.



Figura 3.6: Submarinista en la jaula preparado para bajar a la celda [4]

En las celdas que no tienen comunicación (para evitar que bajara un submarinista) se comprobó la cantidad de material en el interior de ellas gracias a la grúa. Marcando el cable que baja el cazo a 24,1 metros que es la altura de la celda.

Una vez extraído toda la cantidad de material posible, se procede a lastrar ciertas celdas para conseguir una estabilidad adecuada a la hora de navegar hasta su destino. Según estudio del astillero contratado por BAM, recomendó llenar los grupos de celdas 1, 2, 3 y 4 al 22% y las demás celdas, deslastradas totalmente para conseguir seguridad en la navegación y con escora cero. Quedando un desplazamiento total de 7070,7 toneladas. Por lo tanto, la altura metacéntrica teórica con la que debería quedar el cajón es la siguiente:

$$V_c = E \cdot M \cdot C$$

$$\frac{D}{\gamma} = E \cdot M \cdot C$$

$$\frac{7070,7}{1,025} = 19,05 \cdot 17,16 \cdot C$$

$$C = 21,10 \text{ m}$$

$$Kc = \frac{C}{2} = \frac{21,10}{2} = 10,55 \text{ m}$$

$$cM = \frac{I}{V_c} = \frac{\frac{1}{12} \cdot E \cdot M^3}{E \cdot M \cdot C} = \frac{8021,68}{6897,54} = 1,16 \text{ m}$$

$$KG = 10,23 \text{ m (Tabla de momentos)}$$

$$GM = Kc + cM - KG$$

$$GM = 10,55 + 1,16 - 10,23 = + 1,48 \text{ m}$$

El resultado supera el valor mínimo de seguridad de 0,30 para aguas abrigadas y 0,50 para aguas abiertas. Quedando para esta condición con un calado de 21,10 metros. [12]

4. SELECCIÓN DE REMOLCADOR PARA EL TRASLADO Y TREN DE REMOLQUE

Los encargados del traslado han sido dos remolcadores de la compañía Ibaizabal de tipo VWT (Voith Water Tractor). En concreto el “Gatika” y el “Galdames” con idénticas características [13].

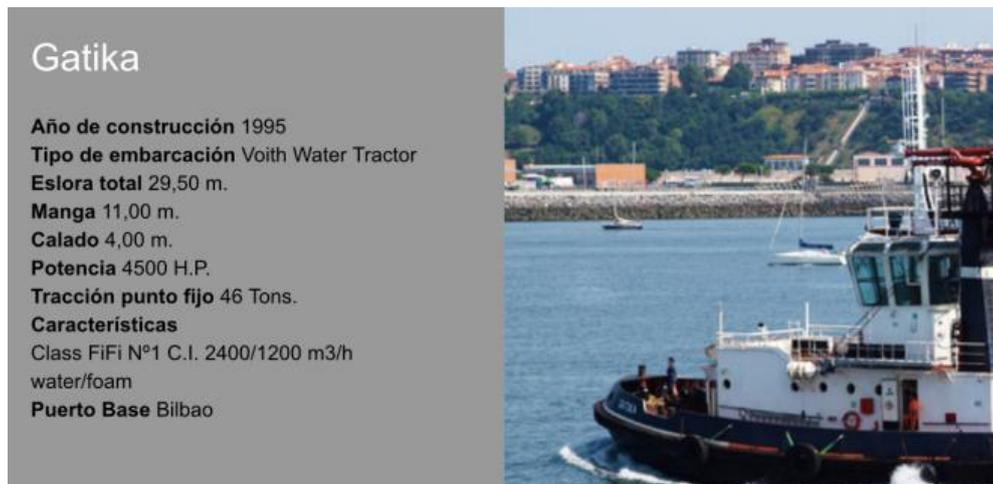


Figura 4.1: Características de los remolcadores [9]

Se han elegido este tipo de remolcadores porque son los que mayor maniobrabilidad tienen. Permiten desarrollar empuje de cualquier magnitud en cualquier dirección con rapidez y precisión combinando la propulsión y la maniobra en una sola unidad. El diseño del puente y de la superestructura están hechos para minimizar la posibilidad de contacto con el remolcado proporcionando al mismo tiempo una perfecta visibilidad a la tripulación. No son los más potentes pero su potencia permite mover el cajón sobradamente, ya que el desplazamiento de este artefacto naval es muy inferior al de los buques que remolcan habitualmente.

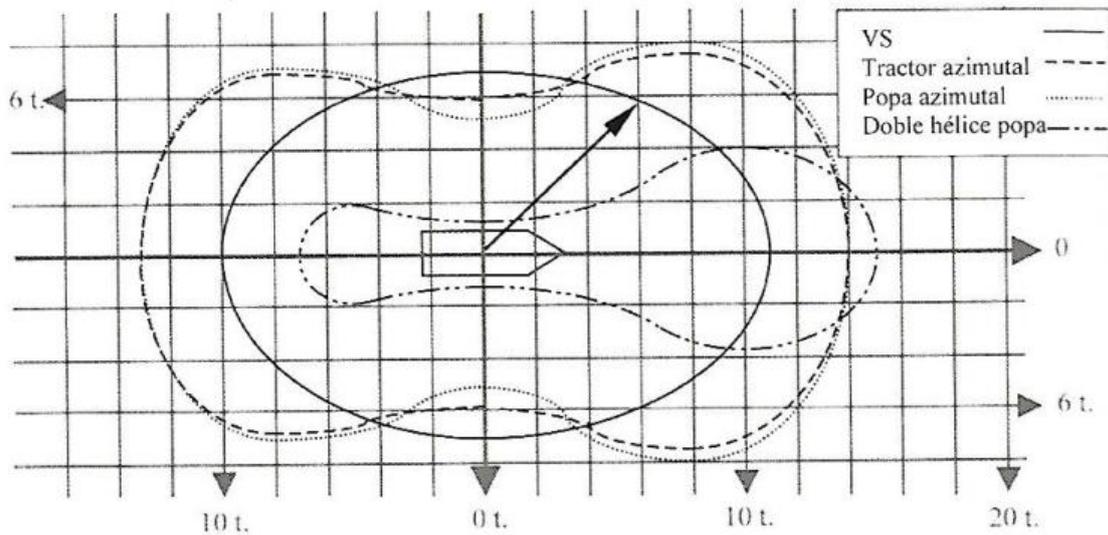


Figura 4.2: Diagrama vectorial de empuje para distintos tipos de remolcador (VWT = VS) [6]

La disposición del remolque ha estado formada por un remolcador por la proa del cajón siendo este el que ha realizado el tiro. Después por la popa del cajón se encontraba el segundo remolcador para guiar ocasionalmente el rumbo si este se desplazaba demasiado hacia los costados. La colocación del cajón navegando fue poniendo una de sus aristas como si fuera una proa. De esta manera, la resistencia al avance es menor. Se pudo colocar de esta manera porque tiene prácticamente la misma eslora que manga y los dos cáncamos del cajón quedan a distancias iguales de la arista escogida como proa. En cuanto al tren de remolque de proa a popa fue el siguiente:

1. Cabo de remolque
2. Pie de gallo
3. Dos cadenas hasta dos cáncamos fijos en el cajón
4. Cajón
5. Una cadena desde un cáncamo del cajón
6. Grillete
7. Cabo de remolque



Figura 4.3: Configuración del remolque [4]

La longitud del cabo de remolque depende de varios factores, tales como: período de la ola, estado de la mar, desplazamiento del remolcado, composición del cable de remolque, profundidad y velocidad de remolque.

Se procurará que remolcador y remolcado coincidan en la cresta o en el seno de la ola simultáneamente para asegurar una tensión de remolque constante. De lo contrario, si el remolcador entra en el seno de una ola y el remolcado sube una cresta se producirá un estrechazo (sacudida que da un cabo en tensión) muy violento que puede llegar a romper el remolque. [7]

Cuanto mayor sea la velocidad de remolque, mayor debe ser la longitud del cabo de remolque por condiciones de seguridad y amortiguamiento de los efectos que se transmiten entre remolque y remolcador. También dependerá del espacio de maniobra disponible, pues para navegaciones por estrechos, ríos o zonas de mucho tráfico, la longitud del remolque será la mínima. En este caso al tratarse de un remolque en aguas portuarias y la velocidad en

torno a 1 nudo, la longitud no fue demasiado grande. No supere los 100 metros durante la navegación en zonas menos abrigadas. [12]

5. PLAN DE NAVEGACIÓN

La navegación que se realiza para el traslado es breve, pero requiere consultar ciertas herramientas. Como la carta náutica profesional que cubre la derrota que va a llevar el remolcador y el remolcado. En este caso la carta náutica en papel del puerto de Bilbao publicada por el Instituto Hidrográfico de la Marina Española es la 3941. También el Almirantazgo inglés proporciona la carta de este puerto. Aunque lo más probable es que el remolcador también trace la derrota en una carta náutica electrónica, y realice desde ahí su seguimiento ya que resulta más cómodo.

Otro aspecto muy importante que hay que tener en cuenta en dicho traslado son las condiciones meteorológicas. Se utiliza la herramienta de previsión de datos oceanográficos que ofrece Puertos del Estado en su página web. Tanto para el oleaje como para el viento y la corriente.

Es más empleada para la navegación en aguas territoriales, la previsión marítima de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Pero en este caso, al ser su previsión para aguas costeras o de alta mar, no ofrece tanto detalle en aguas portuarias como la de Puertos del Estado.

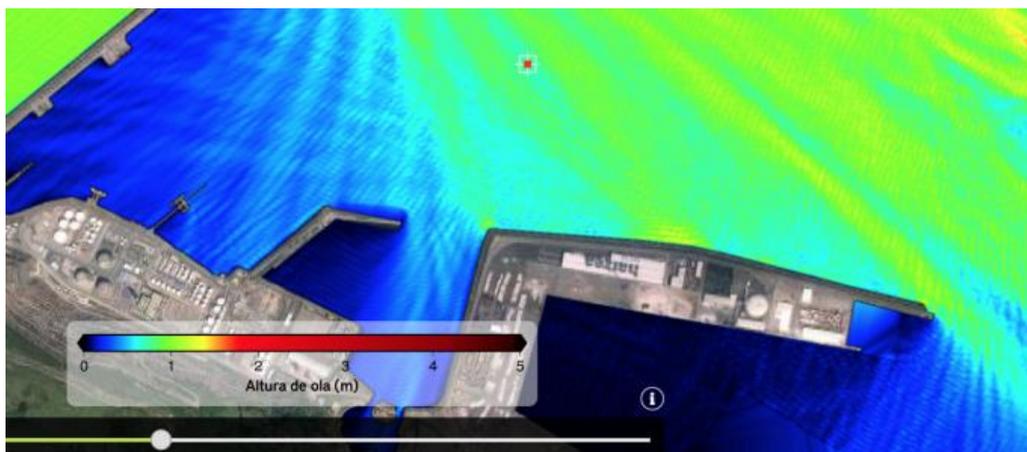


Figura 5.1: Previsión de la altura de oleaje en el interior del puerto [10]

Gracias a esta previsión se puede prever con gran detalle, por donde se verá más resguardada la navegación del oleaje. La altura de ola más grande del recorrido, la sufrirá

poco antes de dejar por el través de babor el dique de Zierbena. Que es de 1,3 metros aproximadamente. Con un periodo de 9 segundos. Este último, si es muy bajo puede generar al conjunto un cabeceo muy seguido e incómodo, aunque la altura de la ola no sea muy grande.

El viento será del SE de fuerza 4. Conviene conocer con mayor detalle la corriente que habrá, debido a que el conjunto se verá más afectado por esta que por el viento. Durante el traslado es mucho mayor el calado del cajón que su francobordo. La zona donde afecta más es justo al salir al canal de navegación. Que es en donde todavía la masa de agua está algo canalizada. Tendrá un rumbo de 120 grados y con unos 0,2 m/s que equivale a casi 0,4 nudos de intensidad.

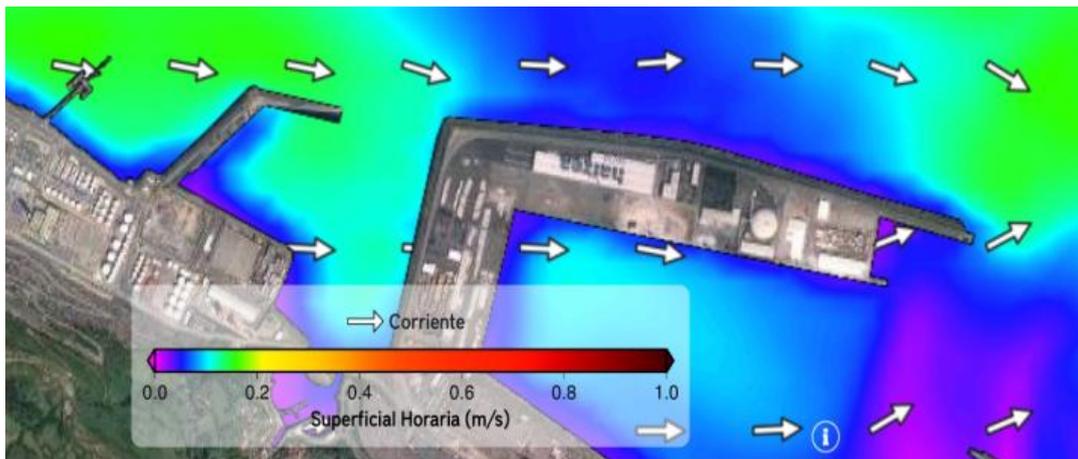


Figura 5.2: Previsión de la corriente marina en el interior del puerto [10]

Todo buque que realice navegación por aguas portuarias tiene que informar de sus intenciones. En este caso, en el puerto de Bilbao el remolcador debe contactar con prácticos a través del canal VHF 12 informando del movimiento del cajón que va a realizar. Indicando la naturaleza del movimiento, muelle desde el que comienza el traslado, hora de comienzo, muelle de destino, hora de finalización estimada y reporte al terminar. Así, si otro buque informa de que solicita permiso para entrar o salir de puerto, los prácticos deciden si son compatibles ambas navegaciones en el interior del puerto o tendrá que esperar.

La distancia total del recorrido es de 2,6 millas. La zona con menos profundidad de la navegación es a la llegada al WP1. A partir del tercer tramo de la derrota el conjunto se ve más expuesto al norte. La mar predominante en el Cantábrico es de NW por lo que el Dique de Punta Lucero protege bastante la derrota. Aunque en la figura de la derrota completa se ve en la carta que el Dique de Punta Galea resguarda del norte, en la realidad ese dique no sobresale fuera del agua. Se empezó, pero no se continuó con su construcción.



Figura 5.4: Derrota completa del traslado [12]

Finalmente, a la llegada a Punta Ceballos Sur la sonda carta es de 22,5 metros. Se encuentra una boya amarilla del tipo marcas especiales. Este tipo de boyas pueden indicar zonas o configuraciones especiales de varios tipos. Como zona de ejercicios militares, zonas reservadas al recreo, indicar la presencia de cables submarinos... pero en este caso indica una zona de vertido de material.

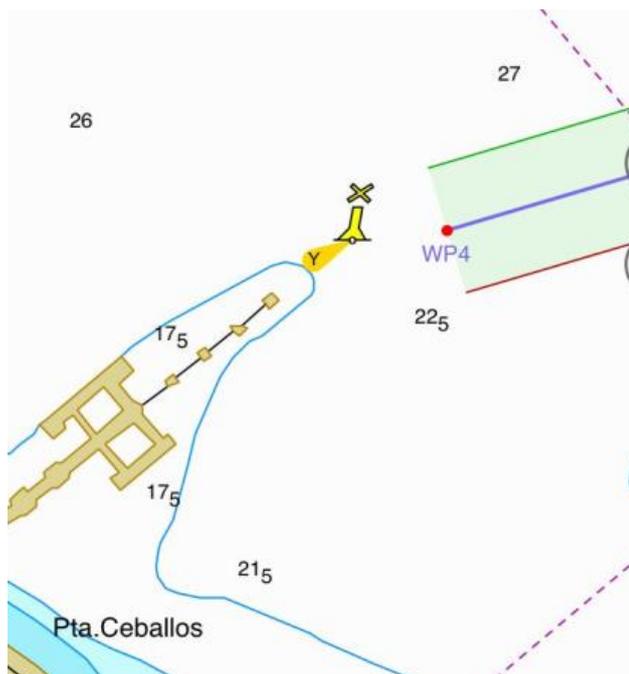


Figura 5.5: Llegada a Punta Ceballos [12]

La ubicación final es la que se muestra en la próxima figura. Proporcionando a los buques la posibilidad de dar cabos por el través de proa. Fortaleciendo así el amarre cuando se ve afectado el atraque por la mar de fondo de componente norte. Ayudando a los largos para que no se separe la proa bruscamente.

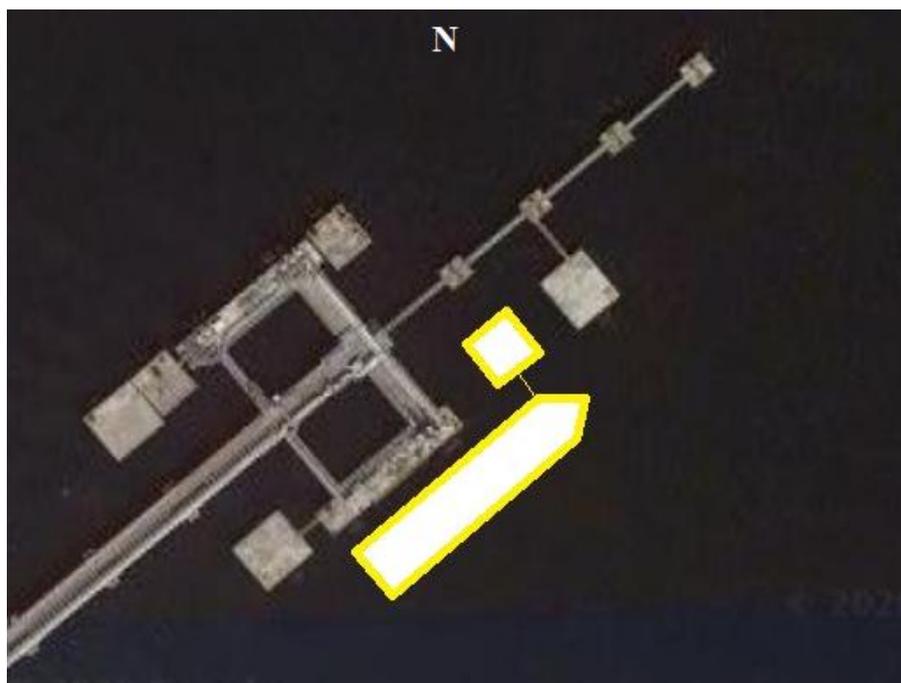


Figura 5.6: Situación final del cajón en Punta Ceballos [12]

5.2. REGLAMENTACIÓN PARA EL TRASLADO

En este capítulo se recoge las luces y marcas reglamentarias que se deben utilizar en la navegación para el traslado del cajón. Además, también se incluyen otras reglas que se deben tener en cuenta para esta operación. El encargado de esta reglamentación es el RIPA (Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes).

En la Regla 1 *Ámbito de aplicación*, dice que el presente Reglamento se aplicará a todos los buques en alta mar y en todas las aguas que tengan comunicación con ella y sean navegables por los buques de navegación marítima.

Ninguna disposición del presente Reglamento impedirá la aplicación de reglas especiales, establecidas por la autoridad competente para las radas, bahías, puertos, ríos, lagos o aguas interiores que tengan comunicación con alta mar y sean navegables por los buques de navegación marítima. Dichas reglas especiales deberán coincidir en todo lo posible con lo dispuesto en el presente Reglamento.

También, ninguna disposición del presente Reglamento impedirá la aplicación de reglas especiales, establecidas por el Gobierno de cualquier Estado en cuanto a utilizar luces de situación y señales luminosas, marcas o señales de pito adicionales para buques de guerra y buques navegando en convoy o en cuanto a utilizar luces de situación y señales luminosas o marcas adicionales para buques dedicados a la pesca en flotilla. En la medida de lo posible, dichas luces de situación y señales luminosas, marcas o señales de pito adicionales serán tales, que no puedan confundirse con ninguna luz, marca o señal autorizada en otro lugar del presente Reglamento.

La Organización podrá adoptar dispositivos de separación de tráfico a los efectos de este Reglamento.

Siempre que el Gobierno interesado considere que un buque de construcción o misión especial no pueda cumplir plenamente con lo dispuesto en algunas de las presentes Reglas sobre número, posición, alcance o sector de visibilidad de las luces o marcas, y sobre la

disposición y características de los dispositivos de señales acústicas, sin perjudicar la función especial del buque, dicho buque cumplirá con aquellas otras disposiciones sobre número, posición, alcance o sector de visibilidad de las luces o marcas, y sobre la disposición y características de los dispositivos de señales acústicas, que a juicio de su Gobierno representen respecto de ese buque el cumplimiento que más se aproxime a lo dispuesto en el presente Reglamento.

Por supuesto, lógicamente, en la Regla 2 *Responsabilidad*, dice que ninguna disposición del presente Reglamento, eximirá a un buque o a su propietario, al Capitán o a la tripulación del mismo, de las consecuencias de cualquier negligencia en el cumplimiento de este Reglamento o de negligencia en observar cualquier precaución que pudiera exigir la práctica normal del marino o las circunstancias especiales del caso. En la interpretación y cumplimiento del presente Reglamento se tomarán en consideración todos aquellos peligros de navegación y riesgos de abordaje y todas las circunstancias especiales, incluidas las limitaciones de los buques interesados, que pudieran hacer necesario apartarse de este Reglamento, para evitar un peligro inmediato.

En la Regla 3 *Definiciones generales*, hay que destacar el apartado g). Ya que define al buque remolcador de este trabajo mientras realiza el traslado. Lo define de la siguiente manera en la expresión “buque con capacidad de maniobra restringida” significa todo buque que, debido a la naturaleza de su trabajo, tiene reducida su capacidad para maniobrar en la forma exigida por este Reglamento, y por consiguiente, no puede apartarse de la derrota de otro buque. Dentro de este mismo apartado, en el subapartado VI) se define todavía más aproximadamente su condición. Buques dedicados a operaciones de remolque que por su naturaleza restrinjan al buque remolcador y su remolque en su capacidad para apartarse de su derrota.

Después de estas reglas hay otras sobre rumbo y gobierno. Pero no veo conveniente citarlas porque el conjunto que navega se entiende que los remolcadores se encuentren en condición de maniobra restringida. Por lo que durante el traslado se paraliza el tráfico marítimo de buques mercantes en aguas portuarias.

Por último, la Regla 24 *Buques remolcando y empujando*, es de gran interés para este caso. Sobre todo, en lo que respecta al apartado c) que dice que todo buque de propulsión mecánica que empuje hacia proa o remolque por el costado exhibirá, salvo en el caso de constituir una unidad compuesta:

- I) en lugar de la luz prescrita en los apartados I) o II) de la Regla 23 a) dos luces de tope en una línea vertical;
- II) luces de costado;
- III) una luz de alcance.

El d) también es de aplicación y dice que los buques de propulsión mecánica a los que sean de aplicación los párrafos a) o c) anteriores, cumplirán también con la Regla 23 a) II).

Mientras que para el cajón del asunto, el apartado g) de esta regla dice que todo buque u objeto remolcado, poco visible y parcialmente sumergido y toda combinación de buques u objetos en los que se den esas mismas circunstancias, exhibirán:

- I) cuando su anchura sea inferior a 25 metros, una luz blanca todo horizonte en el extremo de proa o cerca de éste y otra en el extremo de popa o cerca de este, con la salvedad de que los dragones no tendrán que exhibir una luz en el extremo de proa o cerca del mismo;
- II) cuando su anchura sea igual o superior a 25 metros, dos luces blancas todo horizonte adicional en los puntos extremos de esa anchura o cerca de estos;
- III) cuando su longitud sea superior a 100 metros, luces blancas todo horizonte adicional entre las luces prescritas en los apartados I) y II), de modo que la distancia entre luces no exceda de 100 metros; y
- IV) una marca bicónica en el extremo popel del último buque u objeto remolcado o cerca de ese extremo, y cuando la longitud del remolque sea superior a 200 metros, una marca bicónica adicional en el lugar más visible y tan cerca como sea posible del extremo proel.

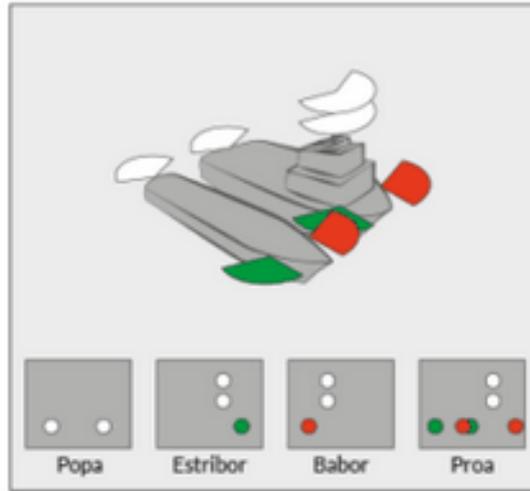


Figura 5.7: Regla 24. Abarloado. Menor de 50 metros [11]

6. PROCESO DE FONDEO DEL CAJÓN FLOTANTE

Para poder fondear el cajón antes se tiene que preparar el perímetro. En este caso mediante escollera de 300 a 1000 kg se forma una banqueta de cimentación. Acabando en forma de talud por los cuatro lados. Esta va enrasada con balasto en la superficie correspondiente al cajón más dos metros de margen. A modo de asiento. Todo esto es vertido por el gánguil.

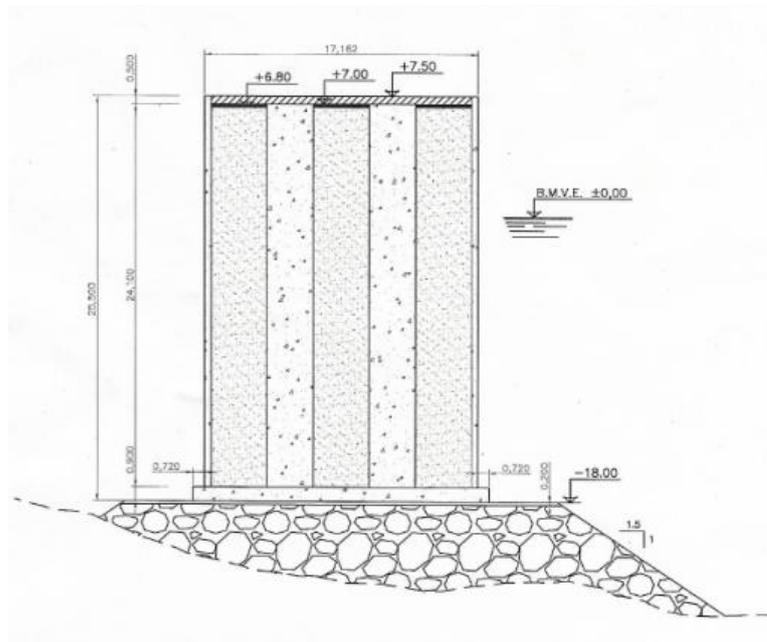


Figura 6.1: Cajón apoyado en el enrase [4]

La profundidad a la que tiene que apoyar la base del cajón en el enrase es de 18 metros. Esta medida es respecto de la bajamar escorada o máxima viva equinoccial.

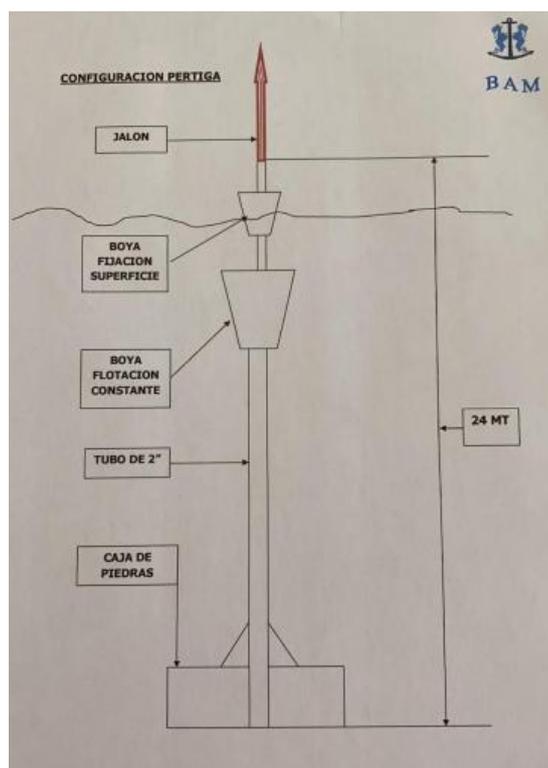


Figura 6.2: Configuración pértiga [4]

El método de comprobación para dejar la superficie lo más lisa posible se realiza mediante la pértiga de la figura. Después de echar cada vertido al agua, desde el gánguil se comprueba en la escala de medición de la pértiga, la altura que hay desde la caja de piedras hasta la altura a la que se encuentre la boya de superficie. Dos submarinistas van desplazando la pértiga sobre el fondo de escollera.

El siguiente plano se encuentra lleno de veriles que proporcionan la información de las profundidades de la zona. Además, de identificar los taludes de las estructuras marítimas de Punta Ceballos. Que son esas zonas en donde los veriles se encuentran muy juntos. Esta información es esencial para saber que zonas tendrán que ser más rellenadas de escollera que otras. Incluso en este caso, algunas zonas hay que dragarlas ya que se encuentran a una profundidad más elevada que la requerida.

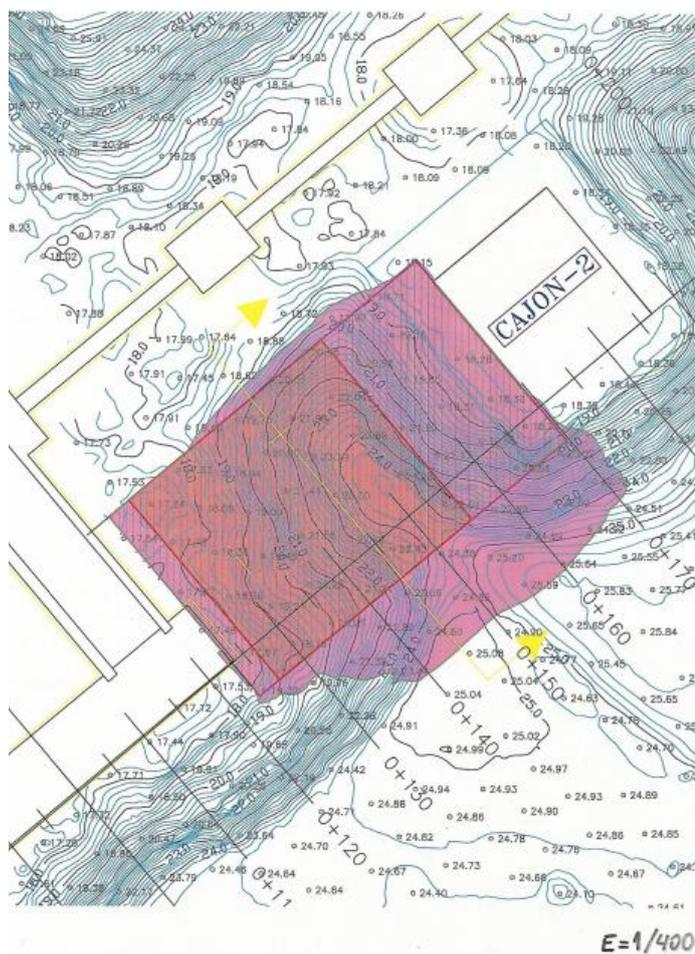


Figura 6.3: Sondeo situación final del cajón en Punta Ceballos [4]

A continuación, se muestra un plano de vertido en el que se divide el trabajo en cuadrículas o calles. Junto con unas boyas de señalización indicando el perímetro. Su función es la de llevar un seguimiento del proceso de vertido para que cuando el gánguil termine una cuadrícula la autoridad portuaria realice un sondeo en la misma. Como se puede ver en ese momento del proceso, había que verter fuera del perímetro del cajón, concretamente las seis primeras son para el talud.



Figura 6.4: Plano vertido cuadrículas [4]

Simplemente la próxima figura muestra el gánguil, posicionado mediante cabos por proa y anclas por popa, vertiendo la escollera para preparar la base del cajón donde va a quedar fondeado.



Figura 6.5: Gánguil vertiendo el material para preparar la base del cajón [4]

Se empezó el traslado con la marea entrante a unas 3 horas de la pleamar para llegar a la posición con agua suficiente para no tocar el enrase en el momento de posicionarlo. El gánguil permaneció cerca del cajón durante su traslado y durante el fondeo. El motivo es que llevaba a bordo un generador para alimentar a las bombas de lastre, por si hubiera sido necesario deslastrar en algún momento debido a alguna entrada de agua inesperada.



Figura 6.6: El cajón, momentos antes de llegar a su posición final [4]

Una vez comprobado que se encontraba en su posición final, se rellenaron las celdas con agua, para evitar que le pusiera en flotación la marea llenante. Mientras tanto, estaba mantenido con tracteles de fijación a tierra y anclas. Después, se aprovechó la bajada de la marea junto con el lastrado de celdas con agua para facilitar el fondeo. Finalmente, sin demorarse demasiado, con el fin de asegurar su estabilidad, se procedió al llenado de sus celdas con material granular.



Figura 6.7: Cajón fondeado en su posición final [4]

7. INCONVENIENTES ENCONTRADOS

El inconveniente más importante encontrado, ha sido el de exceso de calado. Al no poder extraer todos los materiales del fondo de las celdas del cajón. En algunas ocasiones quedaba hasta un metro de material. Sobre todo, en las celdas con comunicación. A pesar del uso de bombas de sólidos, quedaron cantidades de material granular que podían comprometer también la estabilidad del cajón a la hora elegir la cantidad de llenado en cada una de ellas.

En la posición de fondeo con la bajamar máxima viva equinoccial el enrase se sitúa a menos 18 metros sobre la superficie. Por lo que con el calado del cajón siendo superior a 21 metros, el fondeo solo se puede llevar a cabo con una pleamar viva. Por eso la actividad del fondeo estaba prevista para septiembre en donde están las mareas más vivas del año en esta región. Con alturas de marea de casi 5 metros. Pero el retraso en los trabajos de reflote retrasaron la actividad hasta noviembre. Finalmente, se llevó a cabo una pleamar de 4 metros. Quedando un margen de seguridad de algo menos de 1 metro. Escaso ya que el cajón debido al oleaje en ocasiones sufría un pequeño movimiento de arfada aumentando su calado. Se podría haber dejado el enrase a la cota menos 19 metros, para tener un mayor margen de seguridad.

Otro de los mayores inconvenientes fue el movimiento brusco de arfada que presentó el cajón poco después de dejar la ampliación. La mar tendida que hubo ese día de 1,3 metros aproximadamente más, al entrar en sincronía con las olas, provocó que en ciertos momentos quedara apenas el cajón con un metro de francobordo. Fue elegido ese día para el traslado, no por su buena condición meteorológica, si no, por su altura de marea.

Por último, se rompieron algunos cáncamos del cajón por los tirones de los remolcadores. Debido al mal estado de estos y a que los patrones de los remolcadores no acostumbran a maniobrar con un objeto flotante de este tipo. Los barcos con los que están acostumbrados a trabajar tienen bitas resistentes preparadas para aguantar tirones fuertes.

8. CONCLUSIONES

A pesar de ser una actividad poco común, me he dado cuenta de que hay medios locales capaces de llevar a cabo este tipo trabajos. Principalmente ha sido una única empresa la que se ha encargado, junto con la subcontratación de maquinaria de otras empresas.

He podido comprobar la importancia de una correcta coordinación entre las distintas partes. Así, como la continua supervisión del avance de los trabajos. Reiterando, que debido a que las distintas partes no estaban acostumbradas a tratar con una estructura de estas características.

Con respecto al tema meteorológico, no se puede arriesgar lo más mínimo. Este tipo de artefactos navales no están diseñados para navegar y se compromete mucho su estabilidad cuando las condiciones meteorológicas se alejan un poco de las condiciones ideales.

Aunque ha sido una actividad larga y problemática, finalmente se ha podido aprovechar una estructura de hormigón de muchos años que llevaba sin flotar mucho tiempo. Consiguiendo un ahorro económico importante frente a la fabricación de uno nuevo. Podía parecer una idea con pocas opciones de prosperar, pero la realidad es que seguirá siendo útil pasando a formar parte en la operativa del puerto en un atraque para buques de mercancías peligrosas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Fomento. Puertos del Estado (2006). *Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias*. Madrid, España: Autor. Consultado en marzo de 2020.
<http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/CAJONES.pdf>
- [2] Esteban Lefler, F. (2016). Avances tecnológicos en el proyecto y construcción de obras marítimas. *Revista de obras públicas*, 3572. Enero de 2016, 18-27. Consultada en abril de 2020.
http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2016/2016_enero_3572_03.pdf
- [3] <https://vadebarcos.net/2019/01/22/una-breve-historia-de-los-barcos-de-hormigon-armado/> Consultada en abril de 2020.
- [4] Información facilitada por la Autoridad Portuaria de Bilbao.
- [5] Pereda Llamas, J. (2013). *Metodología para el desarrollo de entornos amigables de diseño distribuido en ingeniería utilizando Internet – Aplicación al diseño de cajones flotantes de hormigón armado para muelles y diques*. Tesis doctoral. Valladolid: Escuela de Ingenierías Industriales. Consultada en abril de 2020.
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/4233>
- [6] Basterretxea Iribar, I. (2017). *Aplicaciones de teoría del buque y construcción naval*. Bilbao: Servicio editorial de la Universidad del País Vasco.
- [7] Malonda López, M^a V. (2019). *Estudio hidrodinámico y diseño del remolque para un dique flotante de 10000 toneladas de desplazamiento*. Trabajo de fin de grado. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Consultada en marzo de 2020.
<https://repositorio.upct.es/handle/10317/8087?locale-attribute=en>

- [8] <https://www.baixamar.com/buque.php?id=902> Consultada en abril de 2020.
- [9] <https://www.grupoibaizabal.com> Consultada en junio de 2020.
- [10] <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> Consultada en noviembre de 2020.
- [11] Instituto Hidrográfico de la Marina. (2015). *Reglamento Internacional para prevenir los abordajes en la mar (1972)*.
- [12] Autor
- [13] Voith Turbo Schneider, *Voith Water Tractor (VWT) Best Available Technology*. Heidenheim, Germany.
<https://www.voith.com/ca-en/products-services/power-transmission/applications/voith-water-tractor-14322.html> Consultada diciembre 2020.