

FACULTAT DE NÀUTICA DE BARCELONA (FNB)  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA (UPC)

TRABAJO PRESENTADO EN LA FACULTAT DE NÀUTICA DE BARCELONA PARA  
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA TÉCNICA NAVAL EN PROPUL-  
SIÓN Y SERVICIOS DEL BUQUE (PLAN 2000)

TÍTULO:

**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN BUQUE  
DURANTE LA OPERACIÓN DE DESCARGA DE  
UNA CARGA PESADA**

Autor: Carlos Palos Forcano

Director: Javier de Balle de Dou

Barcelona, otoño 2014









## **RESUMEN DEL PROYECTO**

El objetivo del presente trabajo es el de analizar el comportamiento de un buque y su carga en relación con la estabilidad de ambos.

Puesto que la estabilidad de un buque está expuesta a numerosos factores que pueden tener una influencia sobre la misma y considerando la complejidad analítica vinculada al análisis de estabilidad, el trabajo se centrará en una circunstancia concreta: la operación de descarga de una carga pesada. El análisis se centrará en los cálculos y consideraciones necesarios para garantizar la seguridad tanto para las personas como para las cosas.

La primera parte del trabajo se centra en el estudio analítico teórico de la estabilidad del buque y su carga para la operación de descarga, considerando las características especiales del buque y de la carga, así como la propia operación de descarga.

La segunda parte consiste en la aplicación práctica de los resultados obtenidos en la primera mediante la utilización de datos reales, es decir, datos relativos a las características del buque y de la carga, vinculando así el estudio teórico con su aplicación práctica. Esta segunda parte se completa con la exposición de las circunstancias reales acaecidas en la operación de descarga objeto de análisis.

Las conclusiones que se alcanzan confirman la complejidad analítica vinculada al análisis de estabilidad en las circunstancias particulares objeto del estudio, identificando los aspectos críticos que deben tomarse en consideración para garantizar la seguridad y éxito de la operación. El uso de datos reales aporta una visión concreta de los parámetros analizados que permite entender mejor el impacto de los mismos, permitiendo de este modo una toma de decisiones más ajustada. Finalmente, la situación real expuesta aporta una visión entendedora de las consecuencias de una deficiente planificación o una ejecución incorrecta de una operación de estas características.

## **SUMMARY OF THE PROJECT**

The objective of this project is to analyze the behavior of a ship and her cargo in connection with the stability of both.

Considering that ship stability is subject to many factors that would impact in the same and considering the analytical complexity of the ship's stability, the project will focus on a particular circumstance: the unloading operation of a heavy lift. The analysis will review the calculations and considerations to be taken into account with the objective to guarantee the security for both the persons and the properties.

The first part of the project will focus on the theoretical analytical study of the ship's stability and her cargo for the unloading operation, considering the special characteristics of the ship and the cargo, as well as the unloading operation itself.

The second part is the practical application of the results that have been obtained in the first part by means of the use of real data, that is, data related to the ship and her cargo characteristics, thus linking the theoretical study with its practical application. This second part is complemented with the description of the real circumstances that happened during the unloading operation which is object of our analysis.

The conclusions that are reached confirm the analytical complexity of the stability analysis for the particular circumstances that have been the object of analysis, identifying the critical aspects that have to be considered in order to guarantee the security and success of the operation. The use of real data brings the vision of the parameters that have been analyzed, thus understanding better their impact, leading to a more accurate decision making. Finally, the outcomes arisen from the real unloading operation brings a comprehensive vision of the consequences of a poor planning and incorrect execution of an operation of such characteristics.







## Índice

<b>1- Introducción</b>	<b>1</b>
a. Presentación	1
b. Justificación del proyecto	2
c. Alcance del trabajo	3
d. Metodología y estructura del trabajo	3

### **Primera parte: análisis de las condiciones y sistemas de estabilidad del buque vinculados a la operación de descarga de una carga pesada**

<b>2- Principios generales</b>	<b>6</b>
a. Estabilidad gravitacional	6
b. Concepto de equilibrio	6
c. Definición de estabilidad	6
<b>3- Características del buque con influencia en la estabilidad</b>	<b>8</b>
a. Dimensiones principales	8
b. Carena	9
c. Desplazamiento	10
d. Centro de gravedad	11
<b>4- Consideraciones previas sobre el tipo de buque y carga transportada</b>	<b>12</b>
a. Tipología de operación	12
b. Tipología de buque	12
c. Tipología de carga	13
d. Estiba de la carga	15
e. Atraque del buque	15
f. Operación de descarga	15
<b>5- Carga y traslado de pesos. Variación en centro de gravedad y centro de carena</b>	<b>16</b>
a. Variación del centro de gravedad al cargar un peso	16
b. Variación del centro de gravedad al trasladar un peso	17
c. Variación del centro de carena al cargar un peso	19
d. Variación del centro de carena al trasladar un peso	19
<b>6- Tanques de lastre</b>	<b>21</b>
a. Tanques de trimado	21
b. Tanques estabilizadores	21
c. Funcionamiento de los tanques de lastre	21
<b>7- Estabilidad transversal inicial del buque</b>	<b>23</b>
a. Variación vertical del centro de gravedad y del centro de carena al cargar un peso	23

i.	Variación vertical del centro de gravedad al cargar un peso	23
ii.	Variación vertical del centro de carena al cargar un peso	25
b.	Equilibrio y estabilidad	26
c.	Altura metacéntrica transversal	26
d.	Coeficiente de estabilidad	28
e.	Análisis de equilibrio	29
<b>8-</b>	<b>Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la carga</b>	<b>30</b>
a.	Cálculo de la variación de la altura metacéntrica debido al peso de una carga	30
b.	Posición vertical del centro de gravedad de la carga	31
c.	Efecto de la cuchara de la grúa como peso suspendido	31
d.	Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la grúa sobre cubierta	32
<b>9-</b>	<b>Efecto de la variación del coeficiente de estabilidad sobre la escora</b>	<b>33</b>
<b>10-</b>	<b>Estudio del efecto del movimiento transversal de la grúa sobre la escora del buque</b>	<b>34</b>
<b>11-</b>	<b>Efecto de los tanques estabilizadores</b>	<b>36</b>
a.	Uso de los tanques en modo manual	36
b.	Uso de los tanques en modo automático	37
<b>12-</b>	<b>Resumen de los aspectos a considerar en la planificación de la operación de descarga</b>	<b>38</b>

**Segunda parte: estabilidad del buque y de la carga durante la operación de descarga de una grúa autoportante**

<b>13-</b>	<b>Características del buque porteador y de la grúa.</b>	<b>41</b>
a.	Características del buque porteador	41
b.	Características de la grúa	45
<b>14-</b>	<b>Preparación de la planificación de la operación de descarga</b>	<b>48</b>
a.	Condiciones previas	48
i.	Estiba de la carga	48
ii.	Atraque del buque	48
iii.	Calados, escora y asiento del buque	49
iv.	Dirección de desplazamiento de la grúa	49
b.	Cálculo del ángulo de vuelco de la grúa	49
i.	Sin base estabilizadora	49
ii.	Con base estabilizadora	52

<b>15- Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la carga</b>	<b>53</b>
a. Cálculo de la variación de la altura metacéntrica debido al peso de una carga	53
b. Efecto de la cuchara de la grúa como peso suspendido	56
c. Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la grúa sobre cubierta	59
<b>16- Efecto de la variación del coeficiente de estabilidad sobre la escora</b>	<b>61</b>
<b>17- Efecto de la variación del coeficiente de estabilidad sobre la escora</b>	<b>62</b>
a. Altura metacéntrica inicial = 2,0 m	64
b. Altura metacéntrica inicial = 2,5 m	65
c. Altura metacéntrica inicial = 3,0 m	66
d. Altura metacéntrica inicial = 3,5 m	67
e. Altura metacéntrica inicial = 4,0 m	68
f. Efecto del movimiento transversal de la grúa sobre la escora	69
g. Escora máxima admisible	70
<b>18- Efecto de la cuchara como peso suspendido sobre la escora</b>	<b>74</b>
<b>19- Efecto de los tanques estabilizadores</b>	<b>80</b>
<b>20- Planificación de la operación de descarga</b>	<b>81</b>
<b>21- Situación real acaecida durante la operación de descarga</b>	<b>86</b>
<b>Conclusiones</b>	
<b>22- Conclusiones</b>	<b>94</b>
a. Aspectos generales	94
b. Resultados obtenidos	95
c. Utilización de datos reales	96
d. Situación real acaecida durante la operación de descarga	97
<b>Relación de figuras</b>	<b>99</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>102</b>



## **1- Introducción**

### **a. Presentación**

La Arquitectura Naval ha reconocido desde los primeros tiempos la importancia de la estabilidad entendiendo bien que los buques tienen que sobrevivir a los peligros de la mar. Los problemas de la estabilidad de los buques conciernen a un amplio círculo de profesionales relacionados con el diseño, producción y operación de los mismos.

Proveer a un buque de estabilidad suficiente sigue siendo un reto, debido a dos razones:

En primer lugar, el diseño de los buques se encuentra en constante evolución como consecuencia de los cambios constantes en los requerimientos de mercado. Esto hace que las experiencias anteriores queden parcialmente obsoletas y únicamente aplicables condicionalmente. Los nuevos barcos tienen dimensiones y geometrías de casco diferentes en comparación con el pasado. Los modos de operación también han cambiado significativamente con el incremento del tráfico marítimo.

En segundo lugar, la pérdida de estabilidad o el vuelco en sí mismo es un fenómeno físico complejo, que no dispone de una descripción matemática completa para todos los casos que pueden darse en la práctica.

Adicionalmente, la demanda de la industria para el establecimiento de reglas basadas en el riesgo y regulaciones apropiadas se ha visto incrementada en años recientes. Amplios círculos de profesionales involucrados en todos los aspectos del negocio marítimo son conscientes de que existe un riesgo intrínsecamente asociado al viaje marítimo y querrían entender la dimensión de este riesgo y como controlarlo o minimizarlo.

#### *La pérdida de estabilidad y el riesgo de vuelco*

La cantidad de conocimiento relativo a la estabilidad de los buques acumulado a lo largo de los años es actualmente enorme.

Tal como acabamos de señalar, el estudio de la estabilidad del buque es una materia de gran complejidad que debe considerar distintas vertientes como el diseño del barco, la operación del mismo y aspectos regulatorios a nivel nacional e internacional.

Adicionalmente, existen numerosos factores que tienen influencia sobre la estabilidad del buque como son el propio diseño del mismo, los efectos provocados por la carga, las superficies libres en tanques, las olas, el viento o la densidad del agua.

El mayor riesgo relacionado con la estabilidad de los buques es el riesgo de vuelco, por las desastrosas consecuencias que pueden derivarse tanto a nivel de seguridad de la personas como también consecuencias económicas.

Si bien existen amplios conocimientos sobre estabilidad, el riesgo de vuelco y el impacto de los fenómenos físicos que puedan influir en diferentes situaciones confieren al estudio de estabilidad una enorme dificultad y complejidad.

El objetivo final en la definición de los parámetros de estabilidad de un buque es el de confirmar su operación segura sin que ocurran incidentes que puedan derivar en la pérdida de estabilidad o vuelco durante su vida en servicio. Los fallos en un sistema complejo como es un buque pueden ocurrir en el sistema en sí mismo como una totalidad o solo en alguno de sus elementos. Fallos como el vuelco, colisión con el fondo marítimo o pérdida de resistencia longitudinal supondrán, casi con total seguridad, la pérdida total del sistema denominado "buque". Pero daños a la hélice, sistema de propulsión o cubiertas de bodega, si bien no suponen en general una pérdida total del buque inmediata, pueden suponer el inicio de una serie de fatalidades o eventos en cadena que finalmente concluyan en la pérdida total del buque.

## **b. Justificación del proyecto**

Por todo lo comentado, resulta obvio que el riesgo de pérdida de estabilidad cambiará continuamente con la alteración continua de los criterios de estabilidad. Desafortunadamente, no existe una interdependencia entre los distintos factores que impactan en la estabilidad, por lo que los criterios prácticos de estabilidad no pueden ser expresados de forma explícita por una simple fórmula matemática. Existirá por tanto, un cierto riesgo latente, en una forma implícita.

Tal como ha sido comentado, la estabilidad de un buque está expuesta a numerosos factores que pueden tener una influencia sobre la misma. La amplitud de circunstancias a las que puede verse sometido un buque requiere que el actual estudio se centre únicamente en una de ellas. Este trabajo se centrará en la operación de descarga de una carga pesada, la cual supone una situación compleja y delicada cuya planificación es primordial para que sea ejecutada con éxito.

Finalmente, se completará el trabajo con el estudio de un caso real, lo cual confiere al mismo un mayor alcance al relacionar el estudio teórico con las complejas situaciones reales a las que puede tener que hacer frente un profesional del mundo marítimo, poniendo de manifiesto la relevancia de la toma de decisiones que debe efectuarse en función de las circunstancias que acontecen en cada momento.

Así pues, los elementos que justifican el presente trabajo pueden resumirse en:

- Criticidad del estudio de estabilidad para la seguridad del viaje marítimo.
- Complejidad analítica del análisis de estabilidad.
- Amplitud de los factores que influyen en la estabilidad.
- Visión práctica del análisis matemático con la utilización de datos reales.

### **c. Alcance del trabajo**

#### *Teoría del buque: estabilidad*

El presente trabajo se centra en la Estabilidad de un buque, y por lo tanto está basado en los principios geométricos y mecánicos definidos en la materia denominada *Teoría del buque*.

En el marco de la aplicación de la geometría al estudio del buque, puede definirse la estabilidad como el comportamiento del buque cuando es apartado de la posición de equilibrio por una fuerza, interna o externa.

No serán objeto de este estudio y por tanto no serán tenidas en consideración otras aplicaciones geométricas y mecánicas que conforman la teoría del buque, es decir, la flotabilidad, la resistencia, el medio propulsor, la maniobrabilidad o el comportamiento en la mar.

#### *Operación de descarga*

El trabajo se centra en el estudio relativo a la operación de descarga de una carga pesada previamente cargada en un buque de características especiales, preparado para transportar este tipo de carga pesada.

No será, sin embargo, objeto de análisis la operación de carga de dicha mercancía, centrándonos por lo tanto en la condición del buque y la carga transportada en el momento de producirse la mencionada operación de descarga.

### **d. Metodología y estructura del trabajo**

El trabajo se inicia con una rápida revisión de los conceptos básicos y generales relativos al análisis de estabilidad de un buque, para centrarse a continuación en los elementos concretos a tener en consideración para el estu-



dio de estabilidad relativo a la operación de descarga de una carga pesada con unas características concretas.

Este análisis teórico se completa con un estudio basado en un caso real y con datos reales.

De este modo, el trabajo está estructurado en dos partes: la primera, centrada en el análisis teórico de la estabilidad de un buque y los elementos que impactan en la misma para el caso concreto de la operación de descarga de una carga pesada, y la segunda, en la que se analizará el mencionado caso real y las consecuencias potenciales que pueden derivar de una deficiente planificación de dicha operación.

## **PRIMERA PARTE**

# **ÁNALISIS DE LAS CONDICIONES Y SISTEMAS DE ESTABILIDAD DEL BUQUE VINCULADOS A LA OPERACIÓN DE DESCARGA DE UNA CARGA PESADA**

## **2- Principios generales**

### **a. Estabilidad gravitacional**

Un buque debe estar provisto de una flotabilidad adecuada para soportarse a sí mismo y sus contenidos o cargas transportadas. Es igualmente importante que la flotabilidad exista de tal forma que el buque flote con la actitud adecuada y se mantenga en posición recta. Esto tiene que ver con los cálculos de estabilidad gravitacional y trimado. El presente proyecto se centrará en estos conceptos en relación con condiciones estáticas en aguas calmas, así como el impacto que tendrá una carga externa.

Es importante reconocer que un buque en su entorno natural está sujeto a fuerzas dinámicas causadas principalmente por las olas y el viento. La respuesta específica de un buque a las olas es tratada típicamente de forma separada como análisis de estabilidad dinámica.

También es importante resaltar que un buque puede sufrir inclinaciones en cualquier dirección. Cualquier inclinación puede considerarse en el plano longitudinal o bien en el plano transversal. Cuando tratamos de cálculos de buques, la inclinación en el plano longitudinal se denomina trimado, mientras que la inclinación en el plano transversal se denomina escora y, generalmente, se analizan de forma separada.

### **b. Concepto de equilibrio**

En general, un cuerpo rígido se considera que se encuentra en un estado de equilibrio estático cuando la resultante de todas las fuerzas y momentos actuando sobre el mismo son igual a cero. Cuando tratamos de un cuerpo estático flotante, el interés se centra en la condición de equilibrio asociada con dicho cuerpo en una posición recta en un líquido en calma. En este caso, la resultante de todas las fuerzas gravitatorias (pesos) actuando hacia abajo y la resultante de las fuerzas de flotación actuando hacia arriba sobre el cuerpo son iguales y son aplicadas en la misma línea vertical.

### **c. Definición de estabilidad**

Existen numerosas definiciones de estabilidad. La definición clásica, siendo la formulación contemporánea de la misma la dada por Krylov en 1.958 establece que *"llamamos estabilidad la habilidad de un buque de flotar en la posición recta y, en caso de inclinarse bajo la acción de una causa externa, de volver a la mencionada posición después de que dicha acción externa haya cesado"*.

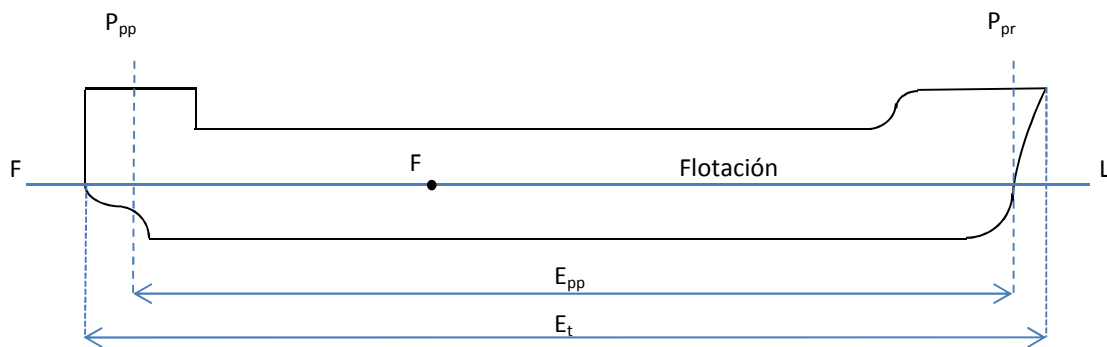
No obstante, esta definición puede parecer artificial porque presupone que las fuerzas externas desaparecerán en el momento en el que nos gustaría para poder definir la estabilidad del buque. Sin embargo, existe una amplia aceptación para considerar adecuada esta definición desde un punto de vista de simulación numérica.

### 3- Características del buque con influencia en la estabilidad

#### a. Dimensiones principales

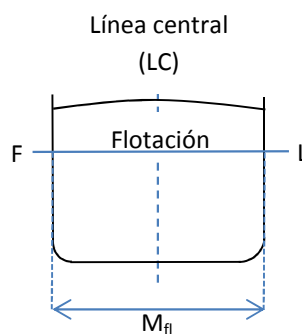
Al objeto de analizar la condición de estabilidad de un buque, se tomarán en consideración las siguientes dimensiones principales del mismo:

- Eslora (E): distancia medida en el sentido longitudinal del buque sobre el plano transversal.
  - Eslora entre perpendiculares ( $E_{pp}$ ): distancia longitudinal comprendida entre la perpendicular de popa y la perpendicular de proa.
  - Eslora total ( $E_t$ ): eslora máxima entre dos planos transversales trazados en los extremos más salientes de popa y de proa del buque.



**Figura 1:** Plano diametral del buque

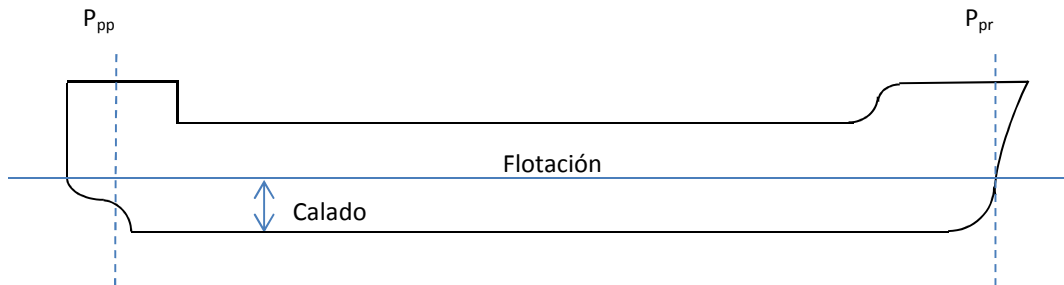
- Manga (M): distancia medida en el sentido transversal del buque.
  - Manga máxima de flotación ( $M_{fi}$ ): distancia transversal máxima de la flotación<sup>1</sup> que se considere.



**Figura 2:** Plano transversal del buque

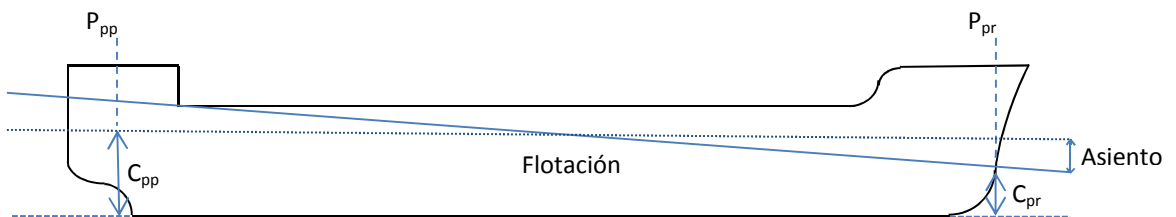
<sup>1</sup> La flotación es línea que se corresponde con la intersección del plano de flotación, coincidente con la superficie horizontal de la mar con su intersección con el casco. El centro de flotación (F) es el centro de gravedad de cada superficie de flotación (ver figura 1).

- Calado (C): distancia medida en el sentido vertical desde un punto cualquiera de una flotación y la línea base del buque.
  - $C_{pp}$ : calado de popa, medido en la perpendicular de popa
  - $C_{pr}$ : calado de proa, medido en la perpendicular de proa
  - $C_m$ : calado medio, medido en la vertical del centro de gravedad de la flotación que se considere.



**Figura 3:** Calado en aguas iguales

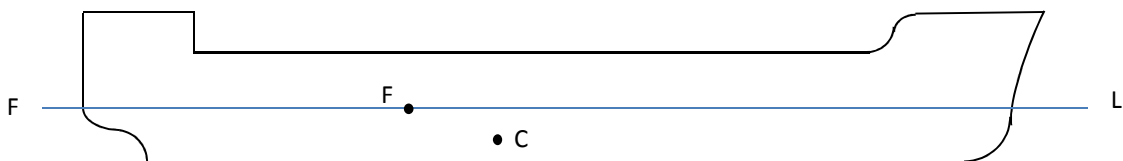
- Asiento (A): diferencia entre el calado de popa y el calado de proa de una flotación determinada.



**Figura 4:** Asiento

### b. Carena

Se define el volumen sumergido (V) o carena al volumen limitado por el casco y la superficie de flotación. Así, el centro de carena (C) es el centro de gravedad del volumen sumergido y se corresponde con el centro de presión del agua sobre el casco.



**Figura 5:** Centro de carena

### c. Desplazamiento

Tal como se ha indicado anteriormente, el proyecto se centra en la estabilidad estática de un buque flotante, es decir, en el análisis de las fuerzas y momentos actuantes sobre el mismo en aguas calmadas. Las fuerzas consisten principalmente en fuerzas gravitacionales (pesos) y fuerzas de flotación. En este sentido, los modelos matemáticos se desarrollan usualmente mediante la utilización del desplazamiento, peso y componentes del peso.

El desplazamiento (D) de un buque equivale a su peso total para una condición de carga concreta. Es igual al volumen sumergido multiplicado por la densidad del agua, por lo que equivale al peso del agua desplazada por ese volumen.

$$D = V \cdot \mu$$

D	desplazamiento en Tm
V	volumen sumergido en m <sup>3</sup>
$\mu$	densidad del agua en Tm/m <sup>3</sup>

El peso total o desplazamiento de un buque pueden determinarse a través de sus marcas de calado o plano de formas<sup>2</sup>.

En conexión con el desplazamiento del buque, se definen otras dos características básicas del buque:

- Peso muerto: diferencia entre el desplazamiento para un calado determinado y el desplazamiento del buque en rosca<sup>3</sup>. El peso muerto comprende la carga del buque así como sus pertrechos.
- Tonelaje o arqueo: medición del tamaño del buque según la Conferencia Internacional sobre Arqueo de Buques de la IMO (International Maritime Organization).
  - Arqueo bruto: tamaño total del buque.
  - Arqueo neto: capacidad utilizable para carga y pasaje.

---

<sup>2</sup> Curvas que representan la superficie interior o exterior del casco. La intersección de la superficie del casco con los planos longitudinal, horizontal y transversal dan las tres series de curvas del plano de formas.

<sup>3</sup> Desplazamiento en rosca: peso del buque una vez completada su construcción, incluida la maquinaria, instalaciones y todos sus accesorios.

#### **d. Centro de gravedad**

La posición del centro de gravedad (G) se corresponde con el punto de aplicación del peso del buque, dependiendo del desplazamiento en rosca y de la distribución de pesos que se realice para dejar el barco en unas condiciones de carga.

La posición del G quedará definida por sus coordenadas en los planos de referencia:

- Plano horizontal: desde la línea base (quilla) para su posición vertical (VG)
- Plano longitudinal: desde la cuaderna maestra para su posición longitudinal (LG)
- Plano transversal: desde la línea central para su posición transversal (TG).

La posición del centro de gravedad puede ser calculada o determinada experimentalmente. Una vez botado el barco después de su construcción el VG puede obtenerse a través de la experiencia de estabilidad, el TG debe ser cero por definición debido a la simetría del buque, y el LG puede ser calculado a partir de la observación de los calados y el asiento.



#### **4- Consideraciones previas sobre el tipo de buque y carga transportada**

Con el objetivo de poder centrar el estudio de estabilidad en la operación concreta objeto de este proyecto, es decir, la descarga de una carga pesada, se presentan en este apartado los aspectos generales más relevantes relacionados con la operación en cuestión.

##### **a. Tipología de operación**

Tal como hemos comentado anteriormente, centraremos el presente trabajo en la operación de descarga de una carga pesada, siendo ésta la única carga transportada por el buque.

El hecho de centrarnos en la operación de descarga frente a la de carga no representa diferencias sustanciales en relación con el estudio de estabilidad y la planificación de la operación. No obstante, la operación de descarga puede enfrentar al profesional marítimo a una serie de cuestiones específicas que deberán ser analizadas para asegurar la seguridad de la operación.

Efectivamente, consideraremos que la operación de carga en origen se efectuó sin incidencias, dejando el barco adrizado y que el transporte marítimo de la carga hasta destino también transcurrió sin problemas. No obstante, la estabilidad del buque puede haberse visto alterada, por ejemplo, debido al consumo de combustible, líquidos o que pueden haberse producido trasiegos de líquidos en los tanques de lastre.

##### **b. Tipología de buque**

El buque porteador consiste en un buque especialmente diseñado para el transporte de cargas pesadas que no pueden ser transportadas por buques de carga normales.

Existen dos tipos de buques para cargas pesadas:

- los barcos semi-sumergibles, conocidos como "flo/flo" por su denominación en inglés "float-on/float-off". Estos buques cuentan con un diseño de cubierta de carga amplia y muy baja (cercana a la línea de flotación) y disponen de tanques de lastre que pueden ser inundados de manera que la cubierta de carga se sitúa muy por debajo del nivel del mar, permitiendo así la carga de carga flotante.



**Figura 6:** Fotografías ilustrativas de buques semi-sumergibles para transporte de cargas pesadas

- Los barcos con medios de carga y descarga propios para ser utilizados en puertos con equipamientos inadecuados.



**Figura 7:** Fotografías ilustrativas de buques no semi-sumergibles para cargas pesadas

A los efectos del presente trabajo, consideraremos un buque para cargas pesadas del tipo no semi-sumergible, provisto de una rampa de carga/descarga situada en popa, para el embarque y desembarque de carga rodante, por sus propios medios.

### c. Tipología de carga

La carga consiste en una grúa móvil de grandes dimensiones y elevado peso (equivalente aproximadamente al 10% del desplazamiento del buque), autopropulsada, es decir, dotada de su propio sistema de tracción accionado por un motor.

Podemos simplificar la configuración general de una grúa de estas características considerando que está formada por un chasis , una base de estabilización formada por cuatro placas de apoyo, una superestructura, una pluma, dos cabinas de mando (una situada en el chasis y otra en la superestructura), unos contrapesos y el sistema de propulsión y desplazamiento (ejes y ruedas). Adicionalmente, la grúa cuenta con una cuchara de grandes dimensiones para manipulación de grano.

Para el análisis de estabilidad de la grúa deberemos considerar los efectos de la pluma y de la cuchara de la misma, actuando como peso suspendido durante la operación de descarga.



**Figura 8:** Fotografías ilustrativas de la tipología de carga considerada

A los efectos de una correcta planificación de la operación de descarga y considerando las características especiales de la grúa, con una elevada altura de su centro de gravedad, resultará conveniente calcular el ángulo de vuelco de la grúa.

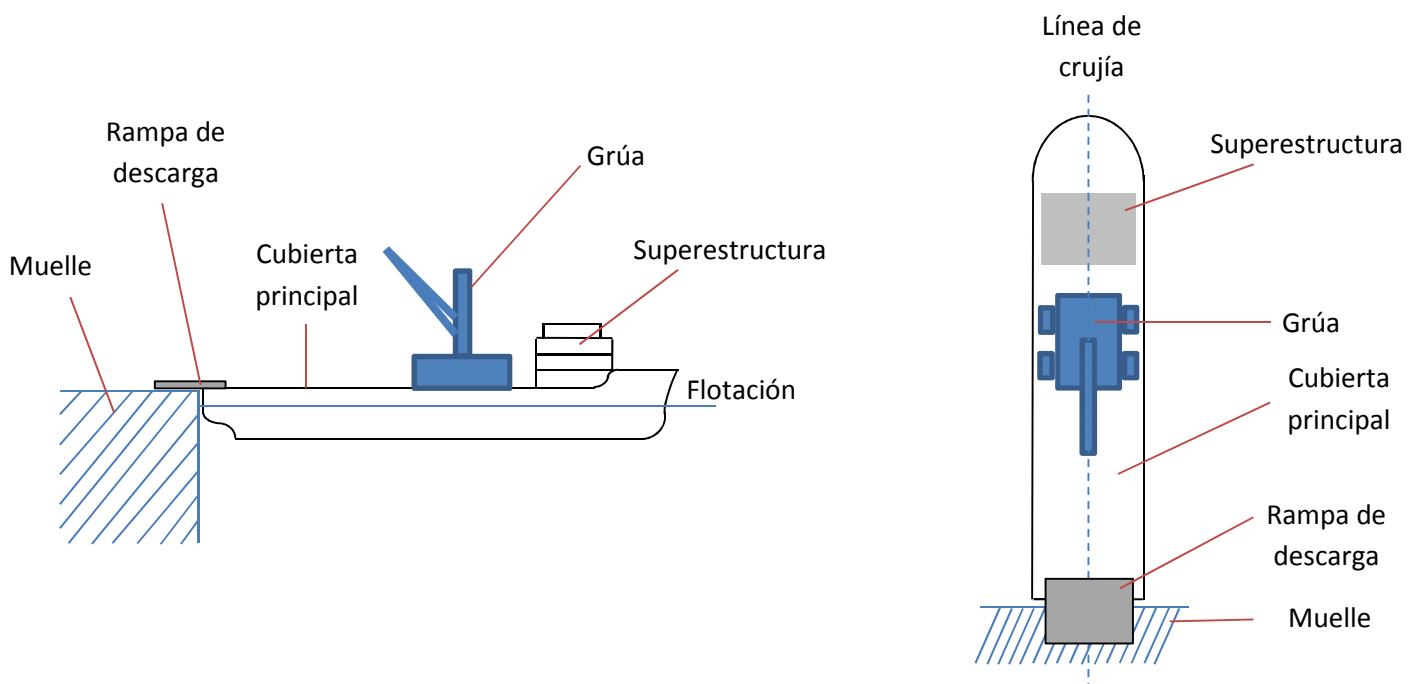
Para ello, lo primero que deberemos determinar es la posición del centro de gravedad de la grúa ( $g$ ). Entendiendo que la posición horizontal del centro de gravedad ( $g_h$ ) de la grúa coincide con la línea central de la misma como consecuencia de la simetría de pesos, deberemos centrarnos en la determinación de la posición vertical del centro de gravedad ( $g_v$ ) de la misma.

#### d. Estiba de la carga

Se considerará la carga estibada sobre la cubierta de carga o cubierta principal del buque, situada a proa de la zona de carga y alineada con la línea de crujía del buque, de modo que la posición transversal del centro de gravedad de la grúa coincide con la línea de crujía.

#### e. Atraque del buque

Para poder efectuar el desembarque de la mercancía por la rampa de popa, consideraremos una posición de atraque del buque con la popa hacia el muelle, tal y como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 9:** Esquema representando la estiba de la mercancía y posición de atraque del buque. Plano longitudinal y plano de la cubierta principal.

#### f. Operación de descarga

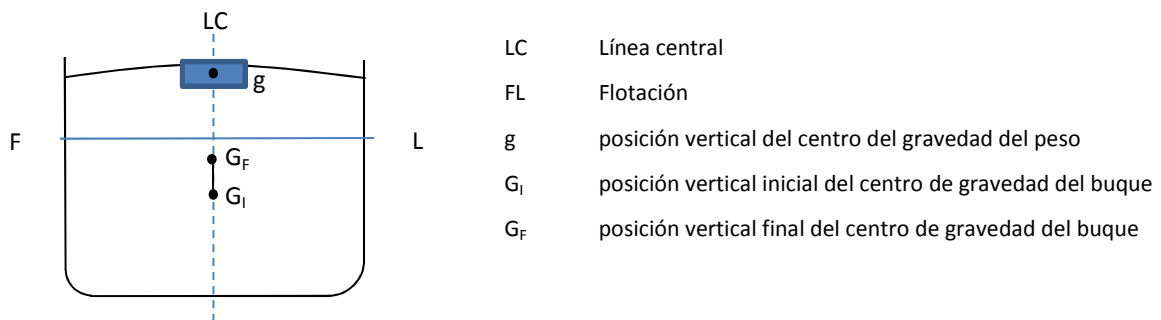
La descarga de la grúa deberá efectuarse por medio del sistema autoportante de la grúa, la cual deberá desplazarse por parte de un operador, en sentido longitudinal sobre la cubierta de carga, de proa a popa, hasta la rampa de descarga del buque, situada en popa.

## 5- Carga y traslado de pesos. Variación en centro de gravedad y centro de carena

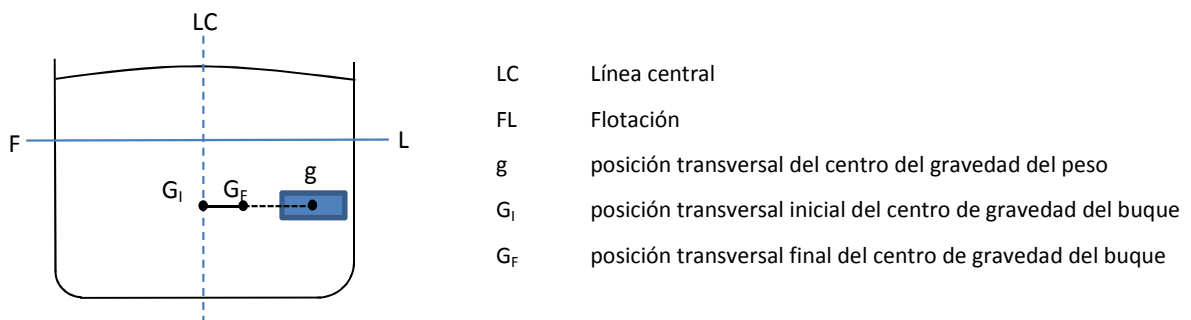
### a. Variación del centro de gravedad al cargar un peso

Las operaciones con pesos que se realizan en el barco y que modifican la posición del centro de gravedad del buque son la carga, descarga y traslado de pesos.

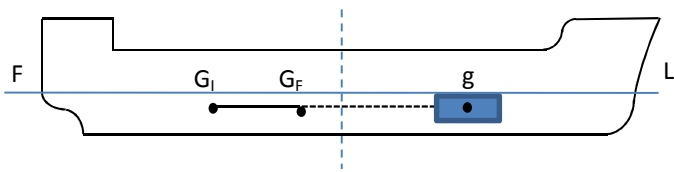
Así, al cargar un peso, el centro de gravedad del buque se mueve hacia el del peso, mientras que al descargar un peso, el centro de gravedad se mueve en la dirección del peso pero en sentido contrario; finalmente, al trasladar un peso, el centro de gravedad se mueve paralelamente a la dirección del traslado y en el mismo sentido.



**Figura 10:** Variación vertical del centro de gravedad por la carga de un peso



**Figura 11:** Variación transversal del centro de gravedad por la carga de un peso



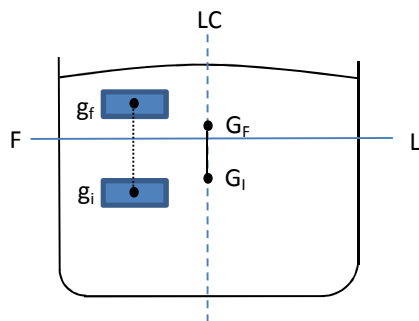
- LC Línea central
- FL Flotación
- g posición longitudinal del centro del gravedad del peso
- $G_I$  posición longitudinal inicial del centro de gravedad del buque
- $G_F$  posición longitudinal final del centro de gravedad del buque

**Figura 12:** Variación longitudinal del centro de gravedad por la carga de un peso

**b. Variación del centro de gravedad al trasladar un peso**

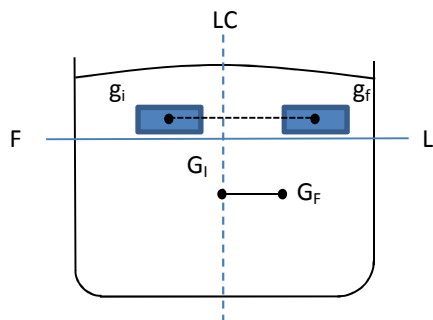
Del mismo modo, se describe el movimiento del centro de gravedad del buque por el traslado de un peso desde una posición inicial  $g_i$  a una posición final  $g_v$  descomponiéndolo en los tres planos principales del buque. En este caso, puesto que no se modifica el desplazamiento del buque, tampoco variará el calado medio.

El centro de gravedad del buque se moverá paralelamente a la línea que une  $g_i g_f$  y en el mismo sentido.



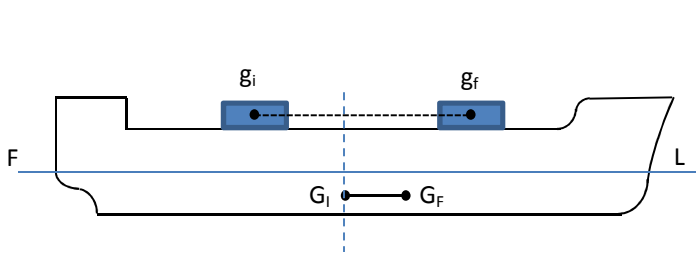
- LC Línea central
- FL Flotación
- $g_i$  posición vertical inicial del centro del gravedad del peso
- $g_f$  posición vertical final del centro del gravedad del peso
- $G_I$  posición vertical inicial del centro de gravedad del buque
- $G_F$  posición vertical final del centro de gravedad del buque

**Figura 13:** Variación vertical del centro de gravedad por el traslado de un peso



- LC Línea central
- FL Flotación
- $g_i$  posición transversal inicial del centro del gravedad del peso
- $g_f$  posición transversal final del centro del gravedad del peso
- $G_I$  posición transversal inicial del centro de gravedad del buque
- $G_F$  posición transversal final del centro de gravedad del buque

**Figura 14:** Movimiento transversal del centro de gravedad por el traslado de un peso



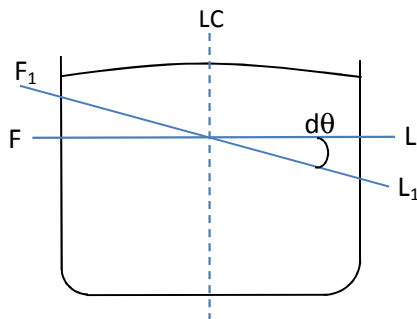
LC	Línea central
FL	Flotación
$g_i$	posición longitudinal inicial del centro del gravedad del peso
$g_f$	posición longitudinal final del centro del gravedad del peso
$G_i$	posición longitudinal inicial del centro de gravedad del buque
$G_f$	posición longitudinal final del centro de gravedad del buque

**Figura 15:** Movimiento longitudinal del centro de gravedad por el traslado de un peso

### Escora y asiento

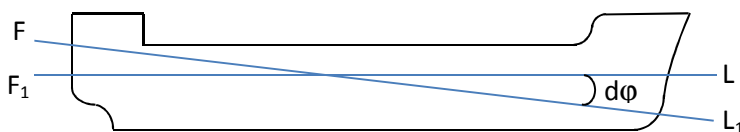
La acción de una fuerza externa producirá una inclinación del buque en dos planos que son el plano de inclinación transversal que queda definido por el eje de inclinación proa-popa y por el plano que pasa por el centro de carena de la posición de adrizado del buque, y el plano de inclinación longitudinal al que corresponde el eje de inclinación babor-estribor y el plano que pasa por la posición inicial del centro de carena.

La inclinación sobre el plano transversal se denomina escora, mientras que la inclinación sobre el plano longitudinal se denomina asiento.



LC	Línea central
FL	Flotación
$F_1L_1$	Plano de inclinación transversal
$d\theta$	Ángulo de escora

**Figura 16:** Inclinación sobre el plano transversal – Escora

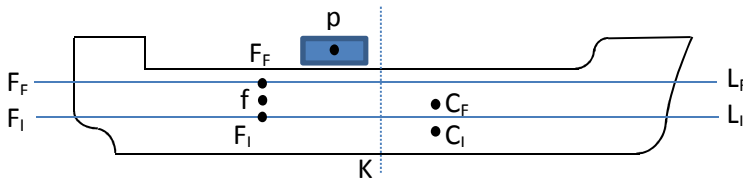


FL	Flotación
$F_1L_1$	Plano de inclinación longitudinal
$d\phi$	Ángulo de inclinación longitudinal o asiento

**Figura 17:** Inclinación sobre el plano longitudinal – Asiento

### c. Variación del centro de carena al cargar un peso

La carga de un peso a bordo del buque provocará una variación de su volumen sumergido y por lo tanto de su centro de carena. Se considerará que la carga no produce escora ni alteración de los calados, pero sí inmersión paralela es decir, que el buque aumentará su calado por igual a lo largo de toda la escora y la nueva línea de flotación será paralela a la anterior.

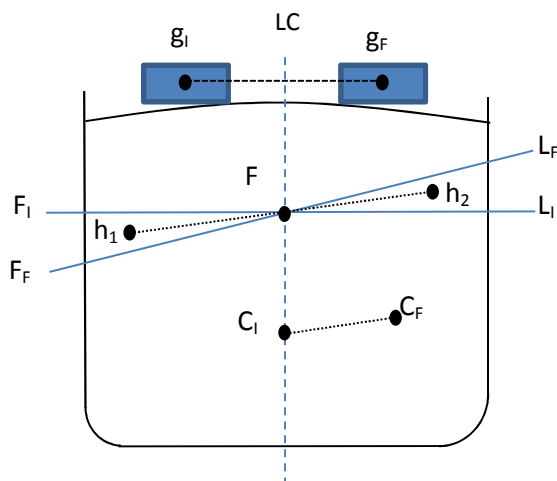


$F_1 L_1$	Flotación inicial
$F_2 L_2$	Flotación tras la carga del peso
$P$	peso de la carga
$F_1$	Centro de flotación inicial
$F_2$	Centro de flotación tras la carga
$f$	Centro de flotación del volumen de inmersión
$C_1$	Centro de carena inicial
$C_2$	Centro de carena tras la carga

**Figura 18:** Variación del centro de carena al cargar un peso

### d. Variación del centro de carena al trasladar un peso

Para el caso de un traslado transversal, la escora que producirá el traslado del peso dará lugar a unas cuñas de inmersión y emersión, cuyos centros de gravedad serán  $h_1$  y  $h_2$  respectivamente. El centro de carena se moverá paralelamente a  $h_1 h_2$  y en la dirección del movimiento del peso.

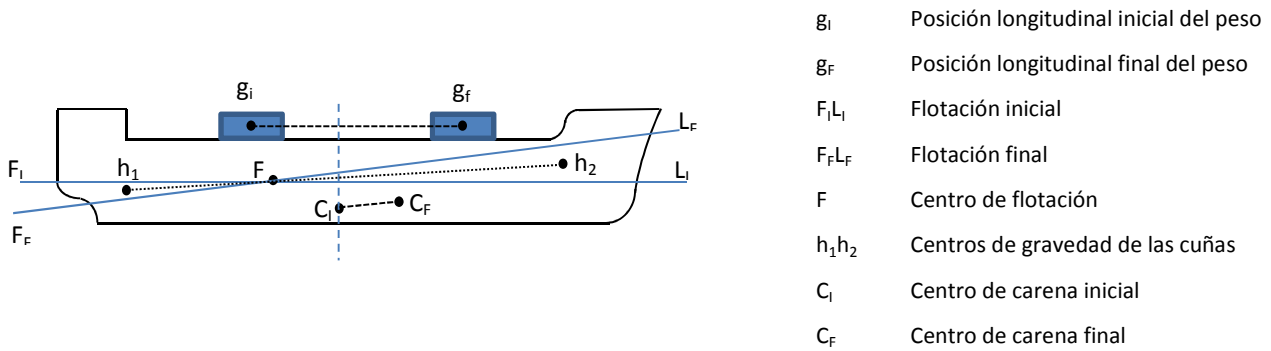


$g_1$	Posición transversal inicial del peso
$g_2$	Posición transversal final del peso
$F_1 L_1$	Flotación inicial
$F_2 L_2$	Flotación final
$F$	Centro de flotación
$h_1 h_2$	Centros de gravedad de las cuñas
$C_1$	Centro de carena inicial
$C_2$	Centro de carena final

**Figura 19:** Variación del centro de carena al trasladar transversalmente un peso



De igual modo, en el caso de tratarse del traslado de un peso en el plano longitudinal se producirá una alteración de los calados, siendo  $h_1$  y  $h_2$  los centros de gravedad de las cuñas de emersión e inmersión, el centro de carena se desplazará paralelamente a ellas y en el mismo sentido al del movimiento del peso.



**Figura 20:** Variación del centro de carena al trasladar longitudinalmente un peso

## **6- Tanques de lastre**

Los tanques de lastre tienen, generalmente, la función común de darle al barco más peso, en definitiva, mayor desplazamiento.

### **a. Tanques de trimado**

Algunos de estos tanques como los piques de proa y de popa, o el denominado tanque de trimado, también se utilizan para tratar de darle al buque un asiento determinado, consiguiendo de esta manera que la cubierta del barco tenga o no una inclinación longitudinal de acuerdo con los requerimientos del transporte de la carga y/o de la navegación a realizar.

### **b. Tanques estabilizadores**

Para conseguir anular la escora de un buque se han desarrollado sistemas automáticos que pueden desplazar rápidamente grandes cantidades de agua a banda y banda del buque.

Estos sistemas estabilizadores de escora pueden consistir en un par de tanques de lastre laterales, unos conductos a través de los que puede pasar el agua y que conectan a los dos tanques, un mecanismo que desplaza agua entre ellos y un sistema de control electrónico automático cuya misión es detectar la escora y en función de ésta, tomar las acciones correctoras necesarias.

En resumen, el funcionamiento de los sistemas automáticos de estabilizadores de escora se basa en desplazar agua de lastre entre pares de tanques laterales, para así equilibrar una carga descentrada o el desplazamiento transversal de una carga.

### **c. Funcionamiento de los tanques de lastre**

Usualmente, los sistemas estabilizadores de escora admiten dos modos de funcionamiento: el manual y el automático.

En el modo automático, el flujo de agua y su sentido son seleccionados y controlados electrónicamente para corregir cualquier ángulo de escora experimentado.

En el modo manual, el sentido del flujo es escogido de forma manual, mientras que la magnitud del flujo puede o no ser controlado electrónicamente en función de los medios técnicos del sistema mecánico que está siendo controlado.

El funcionamiento manual tiene como punto positivo la posibilidad de provocar una condición de pre-escora del buque a una banda, anticipándose de este modo a la estiba de una carga pesada en la banda opuesta.

Los buques de carga pesada suelen emplear sistemas estabilizadores de escora.

## 7- Estabilidad transversal inicial del buque

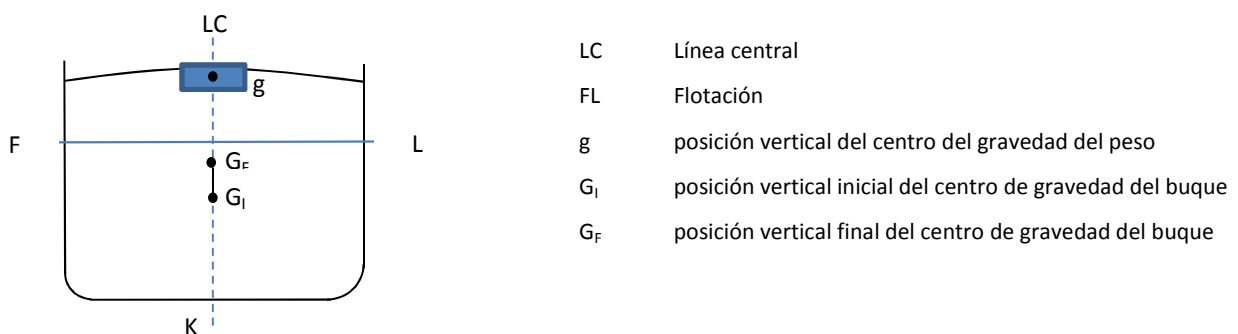
A los efectos del presente trabajo, el análisis se centrará exclusivamente en la estabilidad transversal inicial, siendo un parámetro importante para su medida la altura metacéntrica transversal inicial.

Efectivamente, tal como hemos visto en el apartado 5, si bien la carga o descarga y el traslado de un peso sobre cubierta, como sería el caso del movimiento de descarga de la grúa, produce una alteración tanto del centro de gravedad como del centro de carena en el plano longitudinal, tanto la tipología de operación de descarga como la posición de atraque del buque hacen que éste no tenga una gran relevancia de cara a la estabilidad del buque.

### a. Variación vertical del centro de gravedad y del centro de carena al cargar un peso

Como aspecto previo a analizar los parámetros que definen concretamente la estabilidad del buque, vamos a establecer las fórmulas que definen la variación vertical del centro de gravedad (G) y del centro de carena (C) del buque al cargarse una carga pesada sobre el mismo, ya que tal como se ha comentado previamente, el estudio de estabilidad partirá de una situación de estiba de la mercancía con su centro de gravedad situado en el plano transversal coincidente con la línea central del buque.

#### i. Variación vertical del centro de gravedad al cargar un peso



**Figura 21:** Variación vertical del centro de gravedad por la carga de un peso

Al cargar un peso ( $p$ ), el desplazamiento inicial del buque ( $D_I$ ) se ve modificado del siguiente modo:

$$D_F = D_I + p$$

Siendo  $D_F$  el desplazamiento final del buque tras la carga.

La ecuación de equilibrio, tomando momentos con respecto a la quilla será:

$$D_F.KG_F = D_I.KG_I + p.Kg$$

Por lo que puede calcularse la posición final del centro de gravedad del buque ( $G_F$ ) aislando la variable:

$$KG_F = ( D_I.KG_I + p.Kg ) / D_F$$

Y la posición final del centro de gravedad respecto a la quilla queda definida del siguiente modo:

$$KG_F = KG_I + G_I G_F$$

Si se toman los momentos con respecto a un eje que pase por el centro de gravedad inicial del buque ( $G_I$ ) se obtendría el siguiente resultado:

$$D_F.G_I G_F = D_I.G_I G_I + p.G_I g$$

$$D_F.G_I G_F = D_I.0 + p.G_I g$$

Con  $D_F = D_I + p$ :

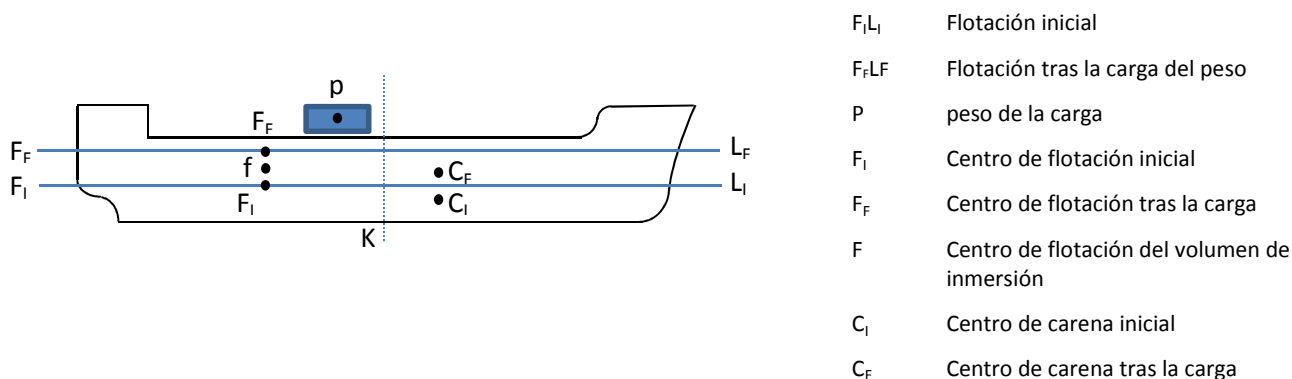
$$(D_I + p). G_I G_F = p.G_I g$$

Aislando  $G_I G_F$  obtenemos la variación del centro de gravedad:

$$G_I G_F = ( p.G_I g ) / ( D_I + p ) = ( p. (kg - kG_I) ) / ( D_I + p )$$

## ii. Variación vertical del centro de carena al cargar un peso

Al tratarse de la carga de un peso grande, el calado se calculará a través del nuevo desplazamiento  $D+p$ , y entrando en las curvas hidrostáticas se obtendrá el calado correspondiente.



**Figura 22:** Variación del centro de carena al cargar un peso

La posición del centro de gravedad correspondiente al incremento de volumen deberá ser calculada como paso previo. Su posición vertical será el calado inicial ( $z$ ) más la mitad de la inmersión:

$$K_f = z + dz/2$$

Tomando momentos con respecto a la quilla del buque ( $K$ ):

$$(D+p).KC_F = D.KC_I + p.( z + (dz/2) )$$

con  $KC_F = KC_I + C_F C_I$

y aislando  $C_F C_I$  obtenemos la variación del centro de carena:

$$C_F C_I = ( p / (D+p) ) . ( z + (dz/2) - KC_I )$$

## **b. Equilibrio y estabilidad**

La estabilidad es la capacidad del buque de volver a su posición de equilibrio, al detenerse la fuerza externa que lo había apartado de la misma. Para que exista equilibrio deben darse dos condiciones: el desplazamiento debe ser igual al empuje y el centro de gravedad (G) debe encontrarse en la misma vertical que el centro de carena (C).

El equilibrio de un buque puede caracterizarse únicamente de dos formas: equilibrio estable o equilibrio no estable. El equilibrio estable corresponde a la condición en la que el barco tiene la capacidad de recuperar la posición inicial de equilibrio, mientras que si no puede recuperar dicha posición, el buque tendrá un equilibrio no estable.

Hablaremos de un buque en condición estable cuando su equilibrio sea estable.

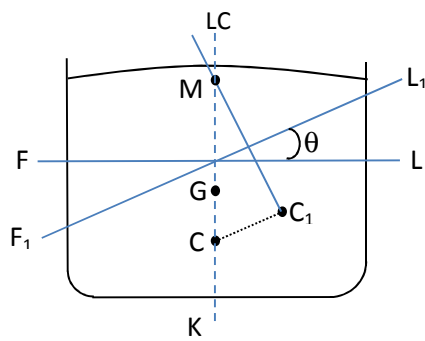
Dentro del concepto de equilibrio no estable, se distingue entre el equilibrio inestable, cuando al ser desviado de su posición de equilibrio el buque tiene tendencia a seguir apartándose de ésta última, y el equilibrio indiferente, cuando el buque permanece en la posición en la que le haya dejado la fuerza aplicada.

## **c. Altura metacéntrica transversal**

Partiendo de una situación de equilibrio, al producirse una escora por la acción de una fuerza externa, trazando una línea correspondiente a la fuerza de empuje vertical que pasa por el centro de carena inicial y otra por el centro de carena final, éstas se cortarán en un punto denominado metacentro transversal (M).

Cuando la situación de equilibrio inicial corresponde a un buque adrizado, la línea de empuje para esta condición coincidirá con la línea central y el metacentro recibe el nombre de metacentro transversal inicial.

La altura metacéntrica transversal es el valor GM, siendo G el centro de gravedad del buque y M el metacentro. El GM se utiliza como valor representativo de la estabilidad estática del buque.



LC	Línea central
FL	Flotación
F <sub>1</sub> L <sub>1</sub>	Plano de inclinación transversal
G	posición transversal del CG
C	posición transversal inicial del centro de carena
C <sub>1</sub>	posición transversal final del centro de carena
M	posición transversal del metacentro
θ	Ángulo de escora

**Figura 23:** Metacentro transversal

*Cálculo de la altura metacéntrica transversal:*

La altura metacéntrica se corresponde con el valor GM, siendo positivo si el metacentro se encuentra por encima del centro de gravedad y negativo en caso contrario. La altura metacéntrica se utiliza como valor representativo de la estabilidad estática transversal inicial.

Tal como se ha visto anteriormente, un buque se encuentra en equilibrio estable si al ser inclinado tiende a volver a su posición inicial. Para que esto ocurra, el centro de gravedad debe encontrarse por debajo del metacentro, es decir, el buque debe tener un metacentro inicial positivo.

La altura metacéntrica está formada por dos términos, uno de ellos depende de las formas del buque y el otro de los pesos que se carguen en el mismo. Dicho de otra manera, hay una componente que se determina durante el diseño del barco de acuerdo con las formas que se le den al mismo, y por lo tanto es un dato que puede obtenerse a través de las curvas hidrostáticas<sup>4</sup>.

La otra componente depende de la carga, descarga y traslado de pesos y su ubicación a bordo.

Es habitual en los buques mercantes que la componente de estabilidad de formas disminuya de valor al aumentar el calado, o lo que es lo mismo, a medida que se va cargando el buque.

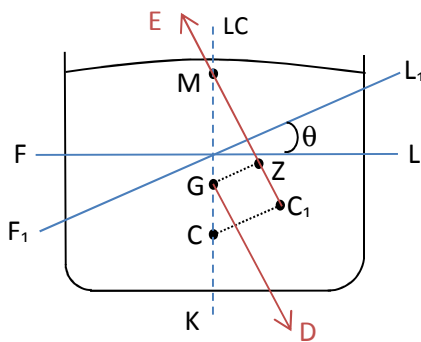
<sup>4</sup> Las curvas hidrostáticas son gráficas cuyos datos han sido previamente calculados a partir de los planos de formas del buque, por lo que se corresponden con la geometría concreta de cada barco. Entrando con el calado medio del buque como dato inicial, se obtienen a través de estas gráficas otros datos como el desplazamiento, posición vertical y longitudinal del centro de carena, posición longitudinal del centro de flotación, etc.



Deberá analizarse consecuentemente como afecta a la altura metacéntrica la carga de una mercancía pesada y su desplazamiento sobre cubierta a lo largo de la operación de descarga.

#### d. Coeficiente de estabilidad

Recordamos que el desplazamiento del buque tiene como punto de aplicación el centro de gravedad (G) mientras que el empuje pasa por el centro de carena (C). Como consecuencia de una inclinación debida a una fuerza exterior el buque sufrirá una escora, desplazándose el centro de carena a la posición  $C_1$ .



LC	Línea central
FL	Flotación
$F_1L_1$	Plano de inclinación transversal
G	posición transversal del centro de gravedad
C	posición transversal inicial del centro de carena
$C_1$	posición transversal final del centro de carena
M	posición transversal del metacentro
$\theta$	Ángulo de escora

**Figura 24:** Coeficiente de estabilidad

En esta situación las fuerzas de desplazamiento y empuje forman un par de fuerzas cuyo momento será:

$$D.GZ = D.GM. \text{sen } \theta$$

D	Desplazamiento del buque
GZ	Brazo del par de giro formado por desplazamiento y empuje
GM	Altura metacéntrica
$\theta$	Ángulo de escora

El momento del par  $D.GM$  recibe la denominación de coeficiente de estabilidad.

### e. Análisis de equilibrio

Las situaciones relativas que pueden ocupar el centro de carena (C), el centro de gravedad (G) y el metacentro (M), definen el equilibrio inicial del buque. Así, pueden definirse las siguientes cuatro situaciones de equilibrio:

- $GM > 0$  y  $CG < 0$  (metacentro por encima del centro de gravedad y centro de gravedad por debajo del centro de carena): equilibrio estable.
- $GM > 0$  y  $CG > 0$  (metacentro por encima del centro de gravedad y centro de gravedad por encima del centro de carena): equilibrio estable.
- $GM < 0$  y  $CG > 0$  (metacentro por debajo del centro de gravedad y centro de gravedad por encima del centro de carena): equilibrio no estable debido a la condición de equilibrio inestable. El par de fuerzas  $D.GZ$  será escorante, aumentando la escora tomada por el buque.
- $GM = 0$  y  $CG > 0$  (metacentro coincidente con el centro de gravedad y centro de gravedad por encima del centro de carena): equilibrio no estable debido a la condición de equilibrio indiferente. El par de fuerzas  $D.GZ$  será nulo, por lo que el buque permanecerá con la escora alcanzada.

Podemos concluir por tanto, que el buque se encontrará en equilibrio estable siempre que la altura metacéntrica sea positiva, mientras que la situación de equilibrio no estable se producirá cuando la altura metacéntrica sea cero o negativa.

## **8- Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la carga**

Consideraremos el efecto que produce sobre el coeficiente de estabilidad el peso de una única unidad de carga, con el objetivo de equiparar el análisis a la situación de carga de la grúa móvil objeto del presente trabajo.

### **a. Cálculo de la variación de la altura metacéntrica debido al peso de una carga**

De acuerdo con lo visto en el apartado 7.a.ii, la variación que sufre la altura metacéntrica cuando se carga un peso puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$dh = ( p / (D+p) ) \cdot ( z + (dz/2) - h - zg )$$

dh    variación de la altura metacéntrica del buque

p    peso de la carga

D    desplazamiento del buque antes de la carga

z    calado medio del buque, antes de la carga

dz    inmersión paralela del calado medio del buque producida por la carga

h    altura metacéntrica inicial antes de la carga

zg    altura del centro de gravedad de la grúa sobre la quilla

Esta fórmula nos permite deducir que la carga de un peso por encima de un plano, denominado plano límite, y que está por debajo de la flotación del buque, produce una variación negativa de la altura metacéntrica.

Con mayor razón, un peso que se carga sobre la cubierta del barco producirá una variación negativa de la altura metacéntrica.

Por tanto, podemos concluir que el valor de la altura metacéntrica, que no es otra cosa si no la medida de la estabilidad inicial, disminuirá.

### **b. Posición vertical del centro de gravedad de la carga**

Tal como acabamos de ver, para calcular la posición vertical del metacentro deberemos determinar la posición del centro de gravedad de la grúa para la condición de descarga.

Una correcta planificación de la operación de descarga requerirá disponer de los datos necesarios para poder determinar con cierta precisión la posición vertical del centro de gravedad.

### **c. Efecto de la cuchara de la grúa como peso suspendido**

A efectos del presente estudio se considerará que la operación de descarga se efectuará con la cuchara de la grúa montada, es decir, colgando de la pluma.

La cuchara colgando del extremo de la pluma de la grúa actúa como un peso suspendido con respecto a la estabilidad del buque. Su efecto es el correspondiente a un peso que estuviera físicamente situado en el extremo de la pluma. En este caso el efecto se cuantifica como el traslado de un peso, el de la cuchara, que pasa a tener su centro de gravedad en el extremo de la pluma.

En definitiva, el tratamiento de un peso suspendido es un problema de un traslado vertical, subiendo un peso, siendo su efecto el de la disminución de altura metacéntrica transversal, siendo necesario conocer el desplazamiento del buque para poder cuantificar esta disminución.

La variación de la altura metacéntrica será:

$$dz_g = \text{Momento vertical} / (D+p)$$

$$y \quad dz_g = -dh$$

$dz_g$  Variación de la posición vertical del centro de gravedad del buque

Momento vertical De la cuchara como peso suspendido

D Desplazamiento del buque

P Peso de la carga

dh Variación de la altura metacéntrica transversal

#### **d. Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la grúa sobre cubierta**

La variación del coeficiente de estabilidad (desplazamiento del buque por la altura metacéntrica transversal), se puede obtener a través de la siguiente fórmula:

$$d(D.h) = p (z + dz/2 - z_g)$$

d(D.h)	variación del coeficiente de estabilidad del buque
D	desplazamiento del buque
h	altura metacéntrica inicial antes de la carga
p	peso de la grúa
z	calado inicial del buque, antes de la carga de la grúa
dz	inmersión del buque producida por la carga de la grúa
z <sub>g</sub>	altura del centro de gravedad de la grúa sobre la quilla

Esta fórmula nos permite deducir que la carga de un peso por encima de un plano, en este caso denominado plano límite del coeficiente de estabilidad, y que coincide muy aproximadamente con la superficie de flotación del buque, es decir, con el calado del buque, nos producirá una variación negativa del coeficiente de estabilidad.

## 9- Efecto de la variación del coeficiente de estabilidad sobre la escora

Dentro de la estabilidad inicial, la escora del buque se calcula según la siguiente fórmula:

$$\tan \theta = Mt / (D_F \cdot h_F)$$

$\theta$	escora del buque
$Mt$	momento transversal producido por la grúa
$D_F$	desplazamiento total (incluido el peso de la grúa)
$h_F$	altura metacéntrica después de cargar el peso
$D_F \cdot h_F$	coeficiente de estabilidad

Si el peso de la grúa no está repartido homogéneamente con respecto a la línea de crujía del buque, se producirá un momento escorante transversal, desprendiéndose de la fórmula para su cálculo, que para un mismo momento escorante transversal si disminuye el coeficiente de estabilidad, aumentarán los grados de escora producidos por el mismo momento.

También disminuirá el coeficiente de estabilidad en el caso de que existan superficies libres<sup>5</sup> en los tanques del buque (combustible, lubricante, agua dulce, lastre, etc.) y/o en el tanque de combustible de la grúa, siempre y cuando estén parcialmente llenos. Efectivamente, el centro de carena del buque se trasladará en función de las cuñas de emersión e inmersión que se produzcan en los tanques, variando por tanto la altura metacéntrica del buque.

---

<sup>5</sup> Los tanques con fluidos que se encuentren parcialmente llenos, presentan una superficie denominada superficie libre.

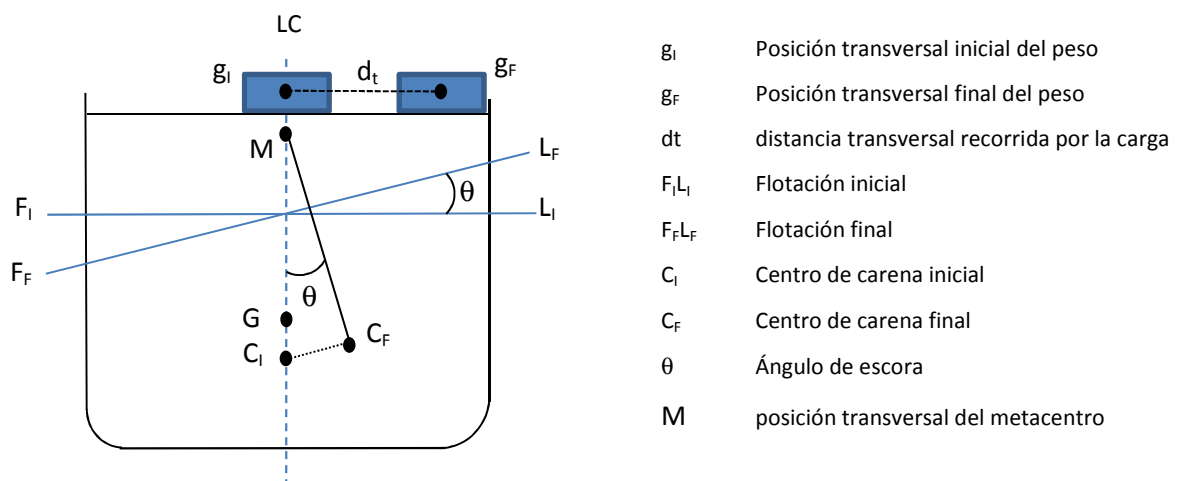
## 10- Estudio del efecto del movimiento transversal de la grúa sobre la escora del buque

Una vez disponemos de la información relativa al efecto que produce la carga sobre la estabilidad del buque, únicamente nos queda analizar el efecto sobre la misma que producirá la operación de descarga. Tal como hemos comentado anteriormente, si la carga se desplaza siguiendo la línea de crujía no se producirá ningún par de fuerzas escorantes, por lo que la estabilidad del buque no se verá afectada.

Sin embargo, considerando lo comprometida que resulta dicha operación, constituiría una buena práctica conocer previamente cuanta distancia en el plano transversal podría separarse el centro de gravedad de la grúa de la línea de crujía en función de los grados de escora que dicha separación produzca sobre el buque, sin comprometer la estabilidad de ésta.

Por tanto, una correcta planificación de la operación de descarga de una carga de las características similares a la de este trabajo deberá contemplar el análisis de la escora que provocaría la grúa en su movimiento transversal, por falta de simetría de peso de la misma con respecto al eje de crujía.

Para el cálculo de las distintas escoras se parte del supuesto de buque adrizado y la grúa con su centro de gravedad sobre la línea de crujía. A partir de aquí se va desplazando la grúa hacia un costado (babor o estribor), trasladándose a su vez el centro de gravedad de la misma hasta su valor máximo, en función de las dimensiones de la carga.



**Figura 25:** Variación del centro de carena al trasladar transversalmente un peso

La escora en la que quedará el buque será aquella para la que se igualen los pares adrizantes y escorantes:

$$P_a = P_e$$

$$D \cdot GZ = p \cdot dt \cdot \cos \theta$$

Dentro de la estabilidad inicial tenemos que:

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

Por lo que la escora quedará definida del siguiente modo:

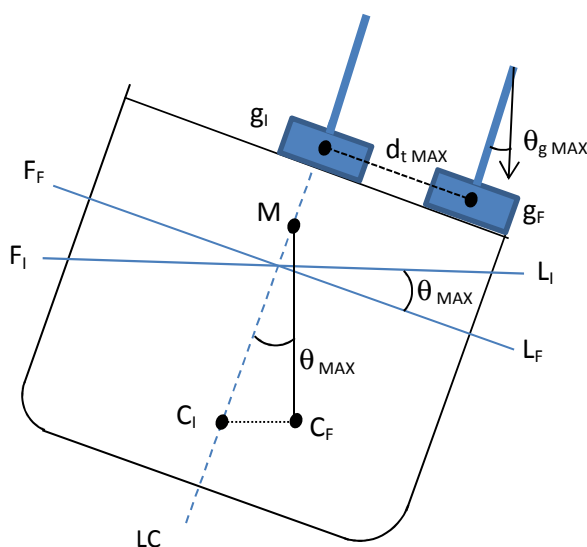
$$D \cdot GM \cdot \text{sen } \theta = p \cdot dt \cdot \cos \theta$$

$$\text{tg } \theta = (p \cdot dt) / (D \cdot GM)$$

Tal como hemos comentado anteriormente, conociendo el ángulo de vuelco de la grúa podemos determinar cuál sería la distancia máxima que ésta podría separarse de la línea de crujía sin comprometer su propia estabilidad. Si  $\theta_{g \text{ MAX}}$  es la inclinación máxima a la que puede someterse a la grúa, entonces:

$$\theta_{\text{MAX}} = \theta_{g \text{ MAX}}$$

$$d_{t \text{ MAX}} = p \cdot ( \text{tg } \theta_{\text{MAX}} / (D \cdot GM) )$$



- $g_i$  Posición transversal inicial del peso
- $g_f$  Posición transversal final del peso
- $\theta_{g \text{ MAX}}$  Ángulo de escora máximo de la grúa
- $\theta_{\text{MAX}}$  Ángulo de escora máximo del buque
- $d_{t \text{ MAX}}$  distancia transversal máxima de desplazamiento transversal de la grúa
- $F_i L_i$  Flotación inicial
- $F_f L_f$  Flotación final
- $C_i$  Centro de carena inicial
- $C_f$  Centro de carena final
- $M$  posición transversal del metacentro

**Figura 26:** Desplazamiento transversal máximo de la grúa



## **11- Efecto de los tanques estabilizadores**

Cómo último elemento a considerar en la planificación de la operación de descarga es el efecto de los tanques estabilizadores.

Tal como se ha comentado anteriormente, estos tanques pueden utilizarse para dejar el buque adrizado cuando se escora como consecuencia de la carga de pesos asimétricos.

Recordamos lo mencionado anteriormente en relación con la capacidad de funcionamiento, en general, de los tanques de lastre en modo automático o manual.

### **a. Uso de los tanques en modo manual**

En caso de ser utilizados en modo manual, resulta importante tomar en consideración que cuando se cargan pesos y al finalizar la carga queda el buque con escora, pueden utilizarse los tanques de lastre, si ello es posible, para adrizarlo. Pero deberá tenerse en cuenta que al descargar el barco, el buque quedaría escorado, precisamente por este lastre que ha sido utilizado para anular la escora producida por la carga.

Adicionalmente, deberá tomarse en consideración el desplazamiento de la grúa durante la operación de descarga y el efecto sobre la escora del buque en caso de que el movimiento no siga perfectamente la línea de crujía del buque.

Efectivamente, cuando se trata de un peso fijo, la utilización de los tanques estabilizadores o de cualquier tanque de lastre, puede facilitar la operación de adrizar el barco. Sin embargo, cuando el peso es móvil, como es el caso de la grúa desplazándose sobre la cubierta del buque, deberá evaluarse correctamente la conveniencia o no de utilizar los tanques de lastre para corregir la escora que pueda producirse.

A modo de ejemplo, consideramos que durante la operación de descarga la grúa se desplaza hacia babor con respecto a la línea de crujía ocasionando una escora a babor de, por ejemplo, 1 grado, y se decide corregir esta escora mediante lastre a estribor. Si a continuación, por los motivos que sea (como por ejemplo, corregir su dirección de traslación) se desplaza hacia estribor, más allá de la línea de crujía, a la escora producida por la grúa, por ejemplo un grado, habrá que sumarle la escora del lastre que anteriormente se ha situado a estribor, con lo cual se sumarían los dos efectos escorantes, obteniéndose una mayor escora que la debida solamente a la grúa (siguiendo con el ejemplo, sería un grado producido por el lastre más otro por la propia grúa, en total dos grados).

### **b. Uso de los tanques en modo automático**

En caso de que los tanques estabilizadores o antiescora puedan ser utilizados en modo automático o semi-automático, deberían estudiarse las posibles interferencias de efectos de acuerdo con el tipo y características del sistema del cual disponga el buque.

## **12- Resumen de los aspectos a considerar en la planificación de la operación de descarga**

Como paso preliminar se han revisado conceptos generales relacionados con la estabilidad de un buque, estableciendo la relación entre estabilidad y equilibrio, la definición de centro de gravedad y centro de carena del buque.

A continuación nos hemos centrado en el caso concreto de una tipología de buque, su carga, la estiba de la misma y la operación de descarga prevista. De su análisis preliminar se desprende que se trata de una operación que entraña cierta complejidad, debiendo ser cuidadosamente planificada para asegurar su éxito, es decir, sin comprometer la seguridad de las personas ni posibles daños a la mercancía o al propio buque.

Del mencionado análisis preliminar se desprende que la elevada altura del centro de gravedad de la mercancía es un elemento de riesgo clave en la operación de descarga. De este modo, el ángulo de vuelco de la grúa así como el efecto de la cuchara como peso suspendido son características que deberán ser consideradas en dicha planificación.

Seguidamente se ha definido el concepto de estabilidad transversal inicial, la determinación de la altura metacéntrica transversal como valor representativo de la estabilidad estática transversal inicial y el coeficiente de estabilidad.

Centrándonos ya en la operación de descarga objeto del trabajo, se ha definido la forma en la que variará la altura metacéntrica inicial de buque debido al peso de la carga, observándose que la misma disminuirá, es decir, provocando en el buque una menor estabilidad.

Así, se ha podido definir la variación del coeficiente de estabilidad del buque como consecuencia de la carga de la grúa y su impacto sobre la escora del mismo.

Todo ello nos permite establecer el efecto que tendría sobre la escora del buque un desplazamiento de la grúa, durante la operación de descarga, que supusiese que el centro de gravedad de la misma se separase en el plano transversal con respecto a la línea central del buque. De este modo, se puede determinar la escora máxima que podría alcanzar el buque para no comprometer la estabilidad de la grúa o la distancia máxima que podría alejarse el centro de gravedad de la misma de la línea central del buque.

Como aspecto final a considerar, se ha revisado la posibilidad de uso de los tanques de lastre, tanto al finalizar la operación de carga como durante la operación de descarga, en sus modos de funcionamiento automático o ma-

nual, con el objetivo de poder corregir posibles escoras asumidas por el buque.

Todo ello constituye una aproximación totalmente teórica que bien merece la pena poner a prueba con datos reales, para así ampliar el estudio y acercarlo a las situaciones con las que puede encontrarse un profesional del mundo marítimo.

En el caso concreto de estudio, existen diversas dificultades que deberán ser superadas, como por ejemplo:

¿Disponemos de todos los datos y características del buque para poder determinar su estabilidad inicial?

¿Cómo puede determinarse la altura metacéntrica inicial?

¿La altura del centro de gravedad de la carga puede ser determinada con exactitud?

¿Qué importancia tiene el centro de gravedad de la carga en relación con la estabilidad del buque?

¿Con qué sistema de lastre y estabilización cuenta el buque?

¿Existen otros aspectos a considerar para asegurar el éxito de la operación de descarga?

A continuación se propondrán respuestas a todas estas preguntas, definiendo la forma de planificar correctamente la operación de descarga así como las consecuencias que no seguir unas buenas prácticas.

## SEGUNDA PARTE

### ESTABILIDAD DEL BUQUE Y DE LA CARGA DURANTE LA OPERACIÓN DE DESCARGA DE UNA GRÚA AUTOPORTANTE

### 13- Características del buque porteador y de la grúa.

#### a. Características del buque porteador

Tal como se ha mencionado en diversas ocasiones, se presentan en este apartado datos reales sobre un buque concreto. No obstante, se evitará hacer referencia concreta al mismo, por lo que denominaremos "buque" al buque porteador, y no se proporcionará su número IMO.

En la siguiente tabla se presentan las características principales del buque porteador:

Nombre	Buque
Año construcción	1978
Bandera	Croata
Tipo de buque	Cargas pesadas
Eslora total	93,50 m
Eslora entre perpendiculares	83,50 m
Manga	16,00 m
Puntal	7,30 m
Calado en carga máxima	4,50 m
Peso muerto	1.970 Tons
Tonelaje bruto	2.883 Tons
Tonelaje neto	865 Tons
Desplazamiento en carga máxima	4.152 Tm
Dimensiones de la bodega	32,4 x 9,0 x 5,4 m
Dimensiones de la escotilla	31,18 x 9,0 m
Carga en cubierta	1.016 Tons
Espacio en cubierta	870 m <sup>2</sup>
Máquinas principales	2
Potencia	3.500 HP
Potencia	2,574 Kw
Propulsores	2
Hélice de proa	1
Velocidad	12 nudos
Bomba de lastre	2 x 500 Tons
Rampa de popa	11,0 x 7,0 m

Se reproduce a continuación unos planos del buque que representan:

- Plano diametral o longitudinal del buque
- Plano de la cubierta principal
- Plano transversal correspondiente a la sección de las chimeneas, a popa
- Plano transversal correspondiente a la bodega.

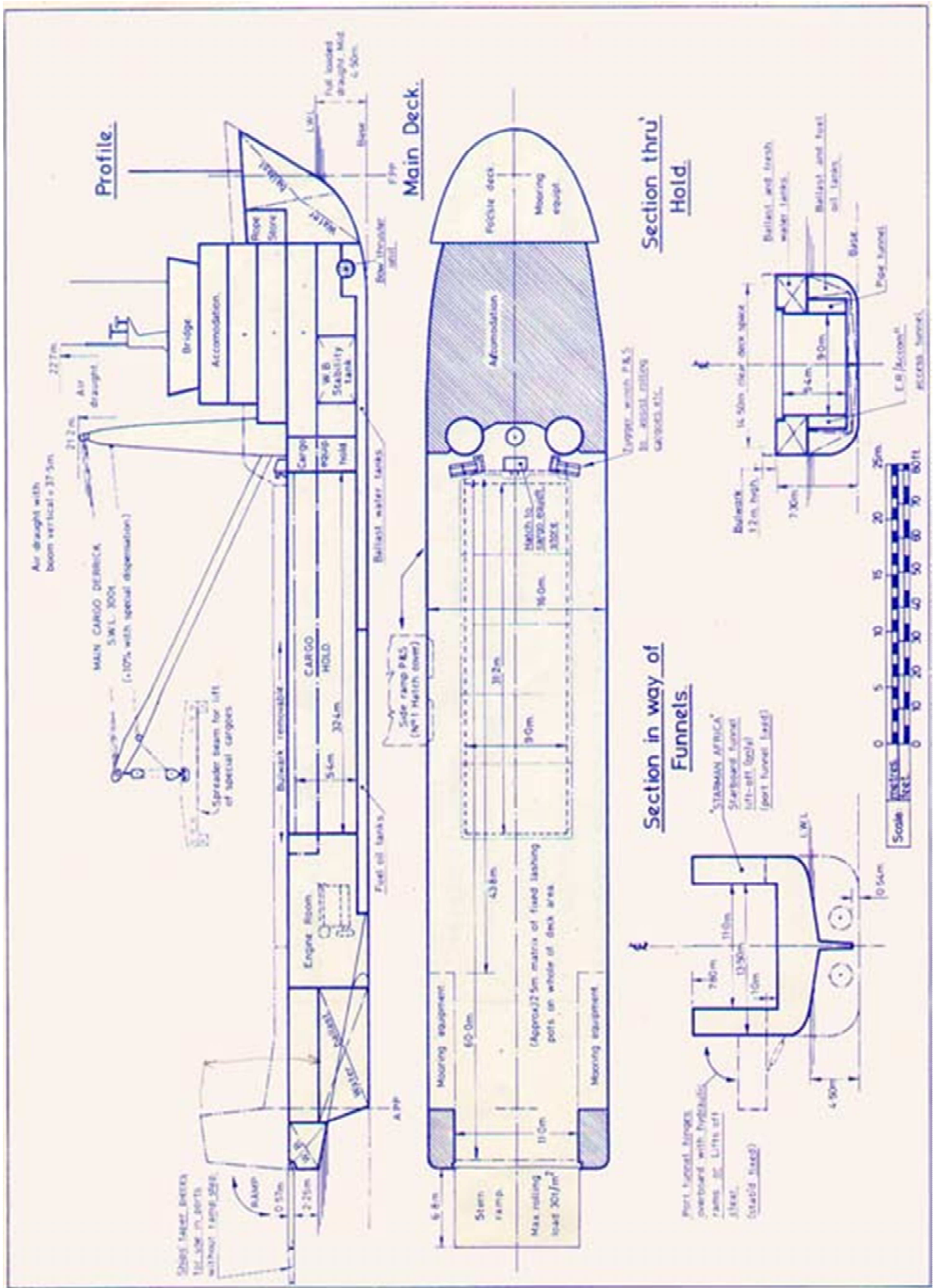


Figura 27: Planos del buque porteador

Se reproduce a continuación dos fotografías del buque porteador:



**Figura 28:** Vista aérea del buque porteador



**Figura 29:** Vista lateral del buque porteador



El buque está diseñado para el transporte de cargas pesadas y tiene una sola bodega corrida. Los espacios de alojamiento de la tripulación y el puente de gobierno están situados a proa, mientras que la sala de máquinas está instalada a popa.

A popa de la superestructura de habitación se extiende la cubierta principal con las tapas de escotillas de la bodega al mismo nivel que la cubierta para facilitar el embarque y desembarque de mercancía rodante.

#### *Rampa de popa:*

En el extremo de popa va instalada una rampa abatible, accionada hidráulicamente, para el embarque y desembarque de carga rodante, por sus propios medios.

A través de los planos puede observarse que la rampa de popa tiene unas dimensiones de 11,0 metros por 7,0 metros, dando una anchura máxima de salida de 11,0 metros. Para poder aumentar el límite de 11,0 metros de paso por la popa del buque, éste presenta una característica especial, que consiste en la posibilidad de abatir o quitar la chimenea de babor dando acceso a vehículos o cargas rodadas que pudieran sobrepasar los 11,0 metros límite normales, y siempre dentro de los valores de incremento que el abatimiento de la chimenea o el que se quitara de su ubicación permitieran.

Los detalles que pueden verse en los planos del buque en la sección transversal correspondiente a la zona de popa donde se encuentran ubicadas las chimeneas, indican que el abatimiento o el hecho de que se quitara la chimenea de babor, daría una mayor anchura de paso relativa, ya que a nivel de cubierta y hasta una altura de 1,0 metros, no puede incrementarse esta anchura.

#### *Tanques de lastre:*

En los planos del buque se observan los siguientes tanques de lastre:

- Tanque de pique de proa
- Tanques estabilizadores
- Tanques de doble fondo
- Tanques altos
- Tanque del pique de proa
- Tanque del pique de popa

Dado el tipo de buque para cargas pesadas y que puede llevar dichas cargas en cubierta, hasta 1.016 toneladas, los tanques de lastre que se observan en los planos indican que el buque puede llevar una capacidad importante de lastre, y así conseguir llegar a sus calados máximos transportando relativamente poca carga. También servirán, en caso de que la carga esté estibada en cubierta, para dotar al buque de una mayor estabilidad incrementando el volumen del área sumergida.

Concretamente, el buque tiene una capacidad total de agua de lastre de 2.245 m<sup>3</sup>. Las operaciones de lastrado y deslastrado de los tanques se realizan desde el puente de gobierno. No obstante, el buque no dispone de indicadores a distancia relativos a las sondas de los tanques de lastre.

El sistema de lastre cuenta únicamente con la posibilidad de uso manual. También resulta relevante indicar que este buque no dispone de sondas manuales en los tanques de lastre, por lo que la determinación de la cantidad de agua de lastre existente en cada uno de los tanques se realiza mediante el cronometraje de los tiempos de bombeo de las dos bombas instaladas a bordo, cuya capacidad es de 500 m<sup>3</sup>/h cada una, o lo que es lo mismo 8,3 m<sup>3</sup>/min. La cantidad de lastre existente en un tanque determinado se calcula multiplicando el número de minutos que se ha estado bombeando agua a dicho tanque por la capacidad de bombeo por minuto.

### **b. Características de la grúa**

Al igual que hemos hecho con el buque, se presentan a continuación datos reales relativos a una grúa autoportante, evitando sin embargo aportar una referencia concreta a la misma, por lo que denominaremos "grúa" a la carga transportada, no aportando el nombre del fabricante ni el modelo de la grúa.

En la siguiente tabla se presentan las características principales de la grúa transportada:

<b>Dimensiones</b>	
Longitud del chasis	17,6 m
Anchura sin placas de apoyo	8,7 m
Base de estabilización	13 x 12 m
Tamaño de las placas de apoyo	2 x 4,5 m
Peso de las plazas de apoyo (4)	10 Tons
Longitud de la pluma	50,5 m
Alcance máximo	50,0 m
Alcance mínimo	11,0 m
Altura del punto de fijación de la pluma	17,0 m
Altura visual del operador	21 m

Contrapeso fijo	130 Tons
Peso total de la grúa montada	420 Tons
Peso de la cuchara	12 Tons
Número de ejes	7
Longitud ejes	4,20 metros
Ejes directrices	6
Ejes motrices	3
Neumáticos	28 unidades
<b>Accionamiento principal</b>	
Tipo	Motor diésel eléctrico
Combustible	Diésel
Refrigerante	agua

Se trata de una grúa autónoma dotada de su propio sistema de tracción compuesto por 7 ejes y 28 ruedas, accionado por medio de un motor diésel.

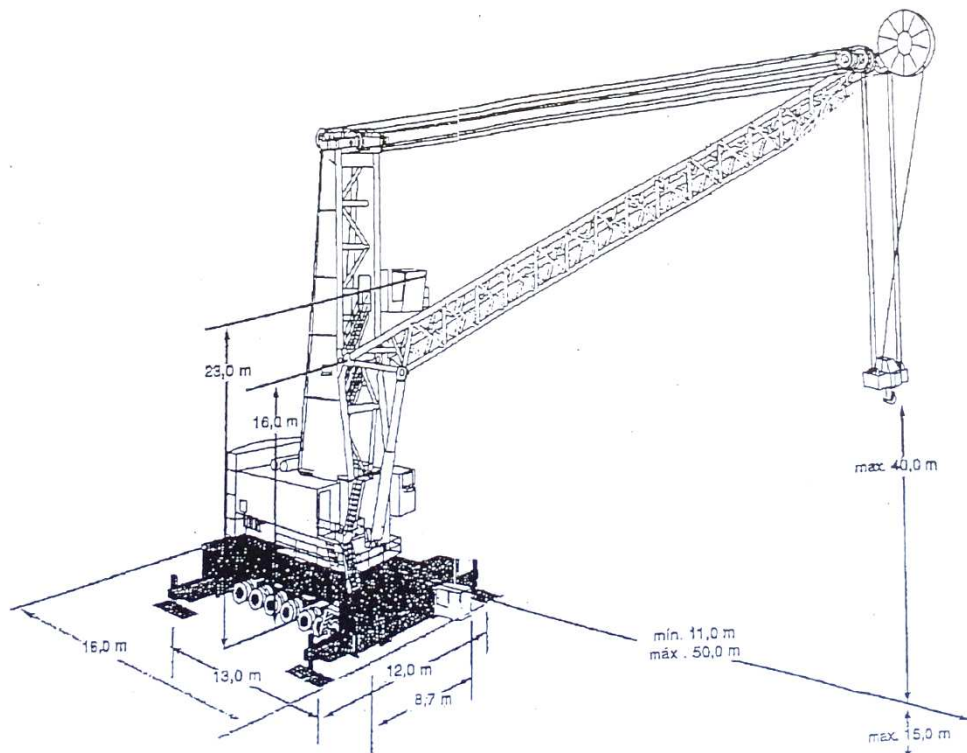
Está dotada de cuatro soportes para la instalación de las placas de estabilización, mediante las cuales se amplía la base de la grúa de 17,6 x 8,7 m (dimensiones del chasis) a un área de 13 x 12 m. Mediante el uso de un sistema hidráulico las placas pueden elevarse y separarse del suelo, permitiendo que la grúa se desplace sin necesidad de desmontar la base de estabilización.

La grúa dispone de dos cabinas de mando, una situada en el chasis y por tanto, a una altura relativamente cercana al suelo, y otra cabina ubicada en la superestructura, a una altura aproximada de 20 metros sobre el suelo.

Se presentan a continuación unas fotografías de la grúa transportada así como un esquema de la misma:



**Figura 30:** Fotografías de una grúa de características similares a la transportada



**Figura 31:** Esquema de la grúa transportada

## **14- Preparación de la planificación de la operación de descarga**

### **a. Condiciones previas**

#### **i. Estiba de la carga**

La grúa se encuentra estibada sobre la cubierta principal, a proa, situada a una distancia de 4 metros desde el mamparo de proa y en una posición aproximada a la posición de simetría con respecto a la línea central del buque.

Efectivamente, considerando las dimensiones de la grúa, en la práctica resulta muy difícil situar la misma en una posición exacta de simetría con respecto a la línea central del buque, es decir, con la posición transversal del centro de gravedad de la grúa coincidiendo con la línea central del buque.

Una buena práctica que debería seguirse en la operación de carga de la grúa sería la de marcar previamente a la misma la posición final deseada sobre cubierta, permitiendo únicamente un ligero desvío de la posición real en la que quede la grúa una vez finalizada la carga.

El transporte de la grúa se efectuó con la base estabilizadora de la misma montada. El chasis de la grúa quedó orientado hacia la proa, es decir, con la cabina de mando también orientada en la misma dirección. Por el contrario, la superestructura, con capacidad para girar sobre el chasis, quedó orientada en sentido contrario, de proa a popa, de forma que la pluma de la grúa se encontraba en posición horizontal, sobre la cubierta principal del buque y su extremo trincado en la zona de popa.

Como consecuencia de la mencionada posición de estiba de la grúa, la operación de descarga no podría realizarse gobernando la misma desde la cabina de mando inferior, situada en el chasis, ya que esto situaría al conductor en sentido contrario al de la marcha, por lo que la grúa deberá ser gobernada desde la cabina ubicada en la superestructura, la cual se encuentra a unos 20 metros de altura sobre el suelo.

Para realizar el viaje marítimo, la cuchara de la grúa fue desmontada y estibada sobre la cubierta principal del buque.

#### **ii. Atraque del buque**

Tal como se ha comentado anteriormente, para poder efectuar el desembarque de la mercancía por la rampa de popa, el buque debe ser atracado con la popa hacia el muelle.

El calado mínimo en la zona de atraque es de 7 metros por lo que, considerando que el calado máximo del buque es de 4,5 metros, resulta amplia-

mente suficiente para asegurar que la quilla o pantoque del buque no tocará fondo durante la operación de descarga, y por tanto no tendrá efecto alguno sobre la flotabilidad y estabilidad del mismo.

Durante la operación de descarga, consideraremos que no existe oleaje ni condiciones meteorológicas adversas que pudiesen influir en la estabilidad dinámica del buque, por lo que la planificación de la misma únicamente deberá tener en cuenta las fuerzas internas, es decir, la estabilidad del buque, el lastre y la propia grúa.

### **iii. Calados, escora y asiento del buque**

Independientemente de la condición en la que haya llegado el buque tras el viaje marítimo, deberá asegurarse que éste presenta la condición de máxima estabilidad posible al inicio de la operación de descarga.

Esto se consigue dejando al buque en sus calados máximos, igual a 4,5 metros, sin escora y sin asiento, mediante el uso de los tanques de lastre.

### **iv. Dirección de desplazamiento de la grúa**

Obviamente y con el objetivo de no afectar la estabilidad transversal del buque, la grúa deberá ser descargada por sus propios medios siguiendo la línea de crujía del buque, en línea recta, en dirección hacia la popa, para salir por la rampa de popa. La distancia a recorrer por la grúa es de aproximadamente 60 metros.

Para proveer de la máxima ayuda al conductor de la grúa, una buena práctica consistiría en marcar sobre cubierta la línea central del buque, de modo que tanto el conductor como el personal de soporte a la descarga puedan situar visualmente y de forma rápida la posición relativa de simetría de la grúa con respecto a la línea de crujía.

## **b. Cálculo del ángulo de vuelco de la grúa**

### **i. Sin base estabilizadora**

Tal como hemos comentado anteriormente, las características de la carga transportada, con un centro de gravedad vertical elevado, hacen necesaria la determinación del ángulo de vuelco de la grúa.

Considerando que la distancia de paso que ofrece la rampa de popa es de 11 metros y que la anchura de la grúa con su base estabilizadora es de 12

metros, ésta última deberá ser desmontada para pasar por la rampa de popa, lo cual es perfectamente posible ya que la anchura del chasis es de 8,7 metros.

Deberá calcularse por tanto el ángulo de vuelco de la grúa para la situación de menor estabilidad, esto es, sin la base de estabilización y con la cuchara colgando.

*Peso de la grúa en la situación de descarga (p)*

Se establece que el peso total de la grúa en estas condiciones es de aproximadamente 422 Toneladas.

$p$  = Peso grúa en situación descarga

$p$  = Peso total grúa – peso placas de apoyo + peso cuchara

$p$  = 420 Tons – 10 Tons + 12 Tons = 422 Tons

*Altura del centro de gravedad de la grúa ( $z_{gc}$ )*

Asimismo, deberá determinarse la altura del centro de gravedad de la grúa sobre el suelo. Ésta información puede ser calculada de forma aproximada o bien obteniendo la información por parte del fabricante, no obstante esta segunda opción puede resultar complicada de obtener, por lo que se propone realizar una aproximación.

Se dispone de la siguiente información de pesos:

<b>Conjunto</b>	<b>Peso (Tons)</b>
Chasis	91,00
Vigas de apoyo	14,40
Placas de apoyo	10,00
Pasarela	1,35
Superestructura	87,90
Cilindro hidráulico	6,60
Cables	6,50
Mástil	39,25
Pie de pluma	14,60
Cabeza de pluma	14,10
Contrapesos	130,00
Gancho de la grúa	3,50
Cuchara	12,00

Enrollador	1,20
Accesorios	1,75
<b>Total</b>	<b>434,15</b>

El peso total de la carga sobre cubierta se establece en 434,15 Toneladas.

En base a dicha información, puede estimarse de forma aproximada, considerando que la inclinación de la pluma no puede determinarse de forma exacta, que la altura del centro de gravedad de la grúa sobre el suelo se sitúa entre los 10 y los 14 metros.

$$10 < z_{gc} < 14 \text{ metros}$$

#### *Anchura del área de la base*

Finalmente, tenemos que la anchura de la base de la grúa en condición de rodadura (distancia entre las ruedas externas) es de 4,20 metros, por lo que la distancia transversal a considerar para el cálculo del ángulo de vuelco es la mitad de dicha distancia, es decir,

$$d = 4,20 / 2 = 2,10 \text{ metros}$$

#### *Cálculo ángulo de vuelco*

Con estos datos, podemos calcular el ángulo de vuelco ( $\theta_{gc \text{ MAX}}$ ) aproximado de la grúa, considerando la hipótesis de 5 posibles valores de altura de su centro de gravedad, mediante la fórmula:

$$\text{sen } \theta_{gc \text{ MAX}} = d/z_{gc}$$

Lo que nos da los siguientes resultados:

<b><math>z_{gc}</math> (metros)</b>	<b><math>\theta_{gc \text{ MAX}}</math></b>
10	12,12
11	11,01
12	10,08
13	9,30
14	8,63

El ángulo de vuelco de la grúa ( $\theta_{gc \text{ MAX}}$ ) variará aproximadamente entre 8° y 12° en función de la altura real de su centro de gravedad.



## ii. Con base estabilizadora

*Anchura del área de la base con placas:*

Las placas de apoyo, en caso de estar montadas, proveen de una base de estabilización ampliamente superior.

En este caso, la distancia a considerar es la mitad de la distancia entre placas (que es de 12 metros), es decir que:

$$d_p = 12/2 = 6 \text{ metros}$$

*Altura del centro de gravedad de la grúa ( $z_{gp}$ )*

La posición vertical del centro de gravedad de la grúa con la base estabilizadora montada no se ve modificada, por lo que  $z_{gc} = z_{gp}$ .

*Cálculo ángulo de vuelco:*

En este caso, el ángulo de vuelco ( $\theta_{gp \text{ MAX}}$ ) será el siguiente:

<b><math>z_{gp}</math> (metros)</b>	<b><math>\theta_{gp \text{ MAX}}</math></b>
10	36,87
11	33,06
12	30,00
13	27,49
14	25,38

Con la base estabilizadora montada, el ángulo de vuelco aumenta considerablemente, entre 25° y 36°, en función de la altura real de su centro de gravedad.

## 15- Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la carga

### a. Cálculo de la variación de la altura metacéntrica debido al peso de una carga

De acuerdo con lo visto en el apartado 8.a, la variación que sufre la altura metacéntrica cuando se carga un peso puede calcularse por la siguiente fórmula:

$$dh = h_{\text{final}} - h = \left( \frac{p}{D+p} \right) \cdot \left( z + \frac{dz}{2} - h - z_g \right)$$

dh variación de la altura metacéntrica del buque

p peso total de la carga

D desplazamiento del buque antes de la carga

z calado medio del buque, antes de la carga

dz inmersión paralela del calado medio del buque producida por la carga

h altura metacéntrica inicial antes de la carga

$h_{\text{final}}$  altura metacéntrica final después de la carga

$z_g$  altura del centro de gravedad de la grúa sobre la quilla

Disponemos de los siguientes datos:

P 434,15 Tons

D 4.152 Tm

$z + dz/2$  aproximaremos este valor al calado máximo del buque (4,5 m)

#### *Determinación de $z_g$*

La distancia  $z_g$  se corresponde a la altura del centro de gravedad de la grúa sobre el suelo ( $z_{gc}$ ) a la que debe sumarse la altura de la cubierta principal sobre la quilla (7,30 m).

En el apartado 14 hemos determinado que la altura del centro de gravedad de la grúa quedaría establecida en un rango de 10 a 14 metros. A efectos del presente cálculo tomaremos como referencia el valor intermedio de  $z_{gc} = 12$  metros, correspondiente a la situación de la grúa con la cuchara colgando de la pluma.

Obtenemos así el valor de  $z_g$ :

$$z_g = 19,30 \text{ metros}$$

#### *Determinación de la altura metacéntrica inicial*

La altura metacéntrica inicial es un dato que puede obtenerse a través de las curvas hidrostáticas del buque. En caso de no disponer de dichas curvas, la altura metacéntrica deberá ser estimada, para lo que realizaremos el cálculo con un abanico de valores hipotéticos de altura metacéntrica correspondientes a las condiciones de tanques con lastre y a falta de cargar la grúa. Los valores que se utilizarán son 1,0 metros, 2,0 metros, 2,5 metros, 3,0 metros, 3,5 metros y 4,0 metros.

Se considera que este abanico de valores contiene el valor real de la altura metacéntrica del buque en la condición del buque con lastre, que llamaremos inicial, y de la que obtendremos el abanico de valores finales de la altura metacéntrica, es decir, con la grúa cargada y en posición de descarga, con la pluma levantada y sin los apoyos de la base estabilizadora.

#### *Cálculo de la altura metacéntrica final*

Aplicando la fórmula para calcular  $dh$  y despejando  $h_{final}$  obtenemos los pares de valores correspondientes a las alturas metacéntricas iniciales y finales, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

<b>h (metros)</b>	<b><math>h_{final}</math> (metros)</b>
1,0	-0,50
2,0	0,49
2,5	0,94
3,0	1,40
3,5	1,85
4,0	2,31

La condición de altura metacéntrica inicial igual a 1,0 metros puede desestimarse puesto que da una altura metacéntrica final negativa, lo que supondría que el buque se encontraría en una situación de equilibrio no estable, lo

que se habría puesto de manifiesto en su comportamiento, incluido la posibilidad de haber volcado, lo cual obviamente no es la situación estudiada.

Puesto que el cálculo lo hemos efectuado tomando en consideración dos valores estimados, que son la altura del centro de gravedad de la grúa y la altura metacéntrica inicial, veremos a continuación como varía la altura metacéntrica final tomando los valores extremos de  $z_{gc}$ , es decir,  $z_{gc}=10$  metros y  $z_{gc}=14$  metros.

- *Altura metacéntrica inicial tomado  $z_{gc} = 10$  metros*

Si  $z_{gc} = 10$  metros, entonces  $z_g = 17,30$  metros

Los pares de valores  $h$  y  $h_{final}$  serían entonces:

<b>h (metros)</b>	<b><math>h_{final}</math> (metros)</b>
1,0	-0,24
2,0	0,67
2,5	1,12
3,0	1,58
3,5	2,03
4,0	2,49

- *Altura metacéntrica inicial tomado  $z_{gc} = 14$  metros*

Si  $z_{gc} = 14$  metros, entonces  $z_g = 21,30$  metros

En este caso, los pares de valores  $h$  y  $h_{final}$  serían entonces:

<b>h (metros)</b>	<b><math>h_{final}</math> (metros)</b>
1,0	-0,60
2,0	0,31
2,5	0,76
3,0	1,22
3,5	1,67
4,0	2,13

### *Variación de la altura metacéntrica final en función de la altura del centro de gravedad de la grúa*

Se presenta a continuación, a modo de resumen, los valores de la altura metacéntrica final en función de los distintos valores de altura del centro de gravedad de la grúa sobre el suelo que han sido considerados:

<b>h</b>	<b><math>h_{final, z_{gc}=10}</math></b>	<b><math>h_{final, z_{gc}=12}</math></b>	<b><math>h_{final, z_{gc}=14}</math></b>
1,0	-0,24	-0,50	-0,60
2,0	0,67	0,49	0,31
2,5	1,12	0,94	0,76
3,0	1,58	1,40	1,22
3,5	2,03	1,85	1,67
4,0	2,49	2,31	2,13

A la vista de los resultados obtenidos, resulta evidente que la posición del centro de gravedad de la carga es relevante puesto que la variación de algunos metros tiene una incidencia directa sobre el valor de la estabilidad estática transversal del buque, que para el caso estudiado, puede llegar a provocar una variación de la altura metacéntrica final de hasta 0,36 m.

#### **b. Efecto de la cuchara de la grúa como peso suspendido**

Tal como se ha comentado anteriormente, durante el viaje marítimo la cuchara de la grúa se encontraba estibada sobre la cubierta del buque. A los efectos de planificación de la operación de descarga, deberá considerarse la conveniencia o no de volver a montar la cuchara para descargar la grúa en su condición de operación normal.

La cuchara de la grúa colgando del extremo de la pluma actúa como un peso suspendido. Su efecto corresponde al de un peso que estuviese físicamente situado en el extremo de la pluma.

Deberá calcularse por tanto la variación de la altura metacéntrica como consecuencia del traslado de un peso en sentido vertical, es decir, desde la posición de estiba en cubierta hasta el extremo de la pluma.

Consideraremos que en la posición de descarga, el extremo de la pluma se encuentra a una altura ( $z_{pl}$ ) de 60 metros sobre el nivel de la cubierta.

El momento vertical producido por la cuchara ( $M_{VC}$ ), como peso suspendido, será:

$$M_{VC} = \text{peso cuchara} \times z_{pl}$$

$$M_{VC} = 12 \text{ tons} \times 60 \text{ metros}$$

$$M_{VC} = 720 \text{ Tons} \times m$$

Entonces, la variación de la posición vertical del centro de gravedad del buque puede calcularse del siguiente modo:

$$d_{zG} = M_{VC} / (D+p)$$

$$d_{zG} = 720 / (4.152 + 434,15)$$

$$d_{zG} = 0,16 \text{ m}$$

Por lo que la variación de la altura metacéntrica transversal (dh), al tratarse de un traslado de peso vertical, será:

$$d_{zG} = - dh$$

$$dh = -0,16 \text{ m}$$

Como puede observarse, lógicamente, la condición de la grúa con la cuchara colgando provocaría una disminución de la altura metacéntrica transversal y por tanto haría disminuir la estabilidad del buque.

#### *Efecto de la cuchara sobre la estabilidad de la grúa*

Al mismo tiempo, en caso de no estar la cuchara colgando, el ángulo de vuelco de la grúa sería superior puesto que la altura de su centro de gravedad disminuiría.

La posición vertical del centro de gravedad de la grúa sin cuchara ( $z_{g_{sc}}$ ) sería:

$$z_{g_{sc}} = ( (p \times z_{gc}) - (p_c \times z_c) ) / (p - p_c)$$

Siendo:

$p$  434,15 Tons (peso total de la grúa)

$p_c$  12 Tons

$z_{gc}$  12 metros (altura del centro de gravedad de la grúa sobre el suelo.  
Valor intermedio del rango considerado  $10 < z_{gc} < 14$  m)

$z_c = z_{pl}$  60 metros (altura del centro de gravedad de la cuchara, igual a la  
altura de la pluma sobre el suelo)

Con los anteriores valores obtenemos La posición vertical del centro de gravedad de la grúa sin cuchara:

$$z_{g_{sc}} = 10,64 \text{ m}$$

Es decir, que en el caso considerado en el cual la grúa con la cuchara colgando dispone de una altura del centro de gravedad situado a 12 metros, sin ésta baja hasta 10,64 m.

En esta situación, variará también el ángulo de vuelco de la grúa, que calculado para la condición correspondiente a la grúa sin la base estabilizadora sería la siguiente:

$$\text{sen } \theta_{g_{sc} \text{ MAX}} = d/z_{g_{sc}}$$

$$\text{sen } \theta_{g_{sc} \text{ MAX}} = 2,10 / 10,64$$

$$\theta_{g_{sc} \text{ MAX}} = 11,38^\circ$$

Es decir, que sin la cuchara colgando del extremo de la pluma de la grúa, el ángulo de vuelco de ésta pasaría de  $10,08^\circ$  a  $11,38^\circ$ .

### *Conclusión acerca del efecto de la cuchara*

Según lo que acabamos de ver, el hecho de descargar la grúa con la cuchara suspendida tiene un doble efecto: disminuye la estabilidad del buque así como el ángulo de vuelco de la grúa.

Consecuentemente, la descarga de la grúa sin la cuchara colgando proveerá a dicha operación de una mayor seguridad en términos de estabilidad del buque y de la grúa.

Podría considerarse no obstante que la variación en ambos parámetros ( $h_{final}$  y  $\theta_{g\ MAX}$ ) no es de una magnitud tan grande como para tener que tomar una decisión definitiva con respecto a este punto, por lo que se continuará el análisis de estabilidad para la condición más desfavorable para ésta, es decir, descargando la grúa con su cuchara colgando.

### **c. Variación del coeficiente de estabilidad debido al peso de la grúa sobre cubierta**

Recordamos que según se ha visto en el apartado 8-d, la variación del coeficiente de estabilidad (desplazamiento del buque por la altura metacéntrica transversal), se puede obtener a través de la siguiente fórmula:

$$d(D.h) = p (z + dz/2 - z_g)$$

d(D.h)	variación del coeficiente de estabilidad del buque
D	desplazamiento del buque
h	altura metacéntrica inicial antes de la carga
p	peso de la grúa
z	calado inicial del buque, antes de la carga de la grúa
dz	inmersión del buque producida por la carga de la grúa
$z_g$	altura del centro de gravedad de la grúa sobre la quilla



A efectos del presente cálculo consideraremos que:

$$P = 434,15 \text{ Tons}$$

$$z + dz/2 = 4,5 \text{ m (aproximaremos este valor al calado máximo del buque)}$$

$$z_g = 21,30 \text{ m (para } z_{gc} = 12 \text{ metros)}$$

Aplicando estos valores obtenemos que:

$$d(D.h) = - 7.293,72 \text{ toneladas x metro}$$

Tal como se había previsto, la carga de la grúa por encima del plano límite del coeficiente de estabilidad y que podríamos asimilar con el plano de flotación del buque, es decir, con el calado del buque, producirá una variación negativa del coeficiente de estabilidad.

## 16- Efecto de la variación del coeficiente de estabilidad sobre la escora

Según hemos podido ver en el apartado 9, la escora del buque se calcula según la siguiente fórmula:

$$\tan \theta = Mt / (D_F \cdot h_F)$$

$\theta$	escora del buque
Mt	momento transversal producido por la grúa
$D_F$	desplazamiento total (incluido el peso de la grúa)
$h_F$	altura metacéntrica después de cargar el peso
$D_F \cdot h_F$	coeficiente de estabilidad

Los coeficientes de estabilidad para la condición de descarga, es decir, con la grúa dispuesta con la pluma levantada y con la cuchara colgando serían los siguientes:

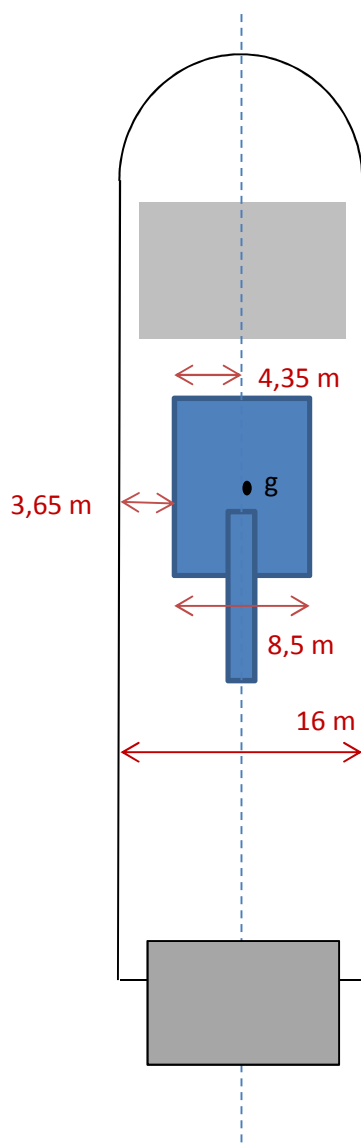
<b>h (metros)</b>	<b><math>h_F = h_{final} (z_{gc}=12)</math> (metros)</b>	<b><math>D_F \cdot h_F</math> (Tons x metro)</b>
2,0	0,49	2.034,5
2,5	0,94	3.902,9
3,0	1,40	5.812,8
3,5	1,85	7.681,2
4,0	2,31	9.591,1

Estos valores de coeficiente de estabilidad serán los utilizados a continuación para los cálculos de la escora del buque.

## 17- Efecto de la variación del coeficiente de estabilidad sobre la escora

Se procederá a continuación a calcular la escora que provocaría la grúa en su movimiento transversal, en caso de no seguir la dirección marcada por la línea central del buque, por falta de simetría del peso de la misma con respecto al eje de crujía.

Para el cálculo de las distintas escoras se parte del supuesto del buque adrizado y la grúa con su centro de gravedad situado sobre la línea de crujía. A partir de aquí se analiza su desplazamiento hacia un costado (por ejemplo, babor), trasladándose a su vez el centro de gravedad de la misma hasta un valor máximo definido por las dimensiones de la grúa (anchura del chasis) y la manga del buque.



**Figura 31:** Brazo máximo correspondiente al desplazamiento transversal máximo del centro de gravedad de la grúa

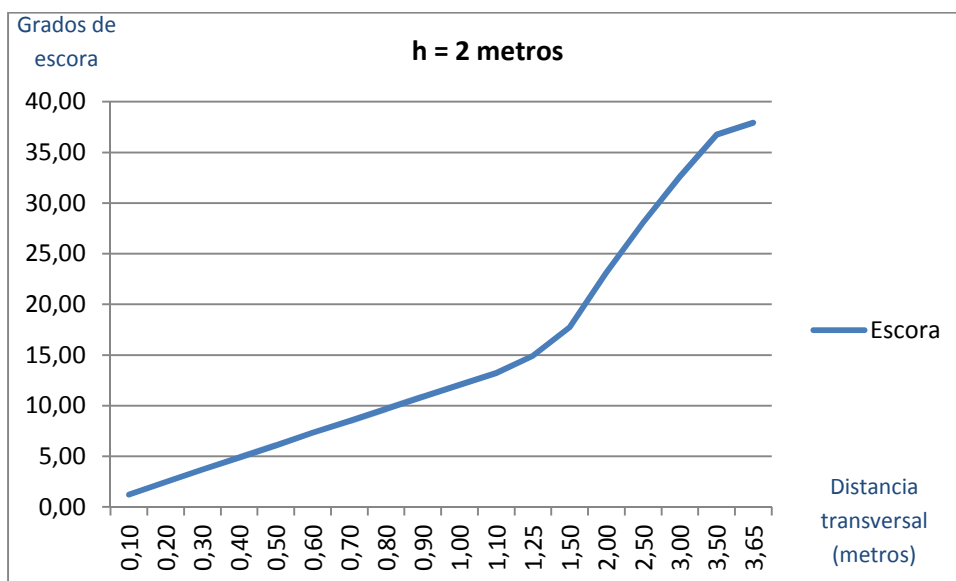
Se analizará por tanto la escora que provoque el desplazamiento transversal de la grúa desde la posición inicial (distancia transversal = 0) hasta el valor máximo marcado por las dimensiones del chasis y cubierta (distancia transversal máxima = 3,65 m).

Puesto que se desconoce la altura metacéntrica inicial del buque y por tanto ha debido ser estimada, se realizarán los cálculos de escora para cada una de las distintas alturas metacéntricas consideradas.

**a. Altura metacéntrica inicial = 2,0 m**

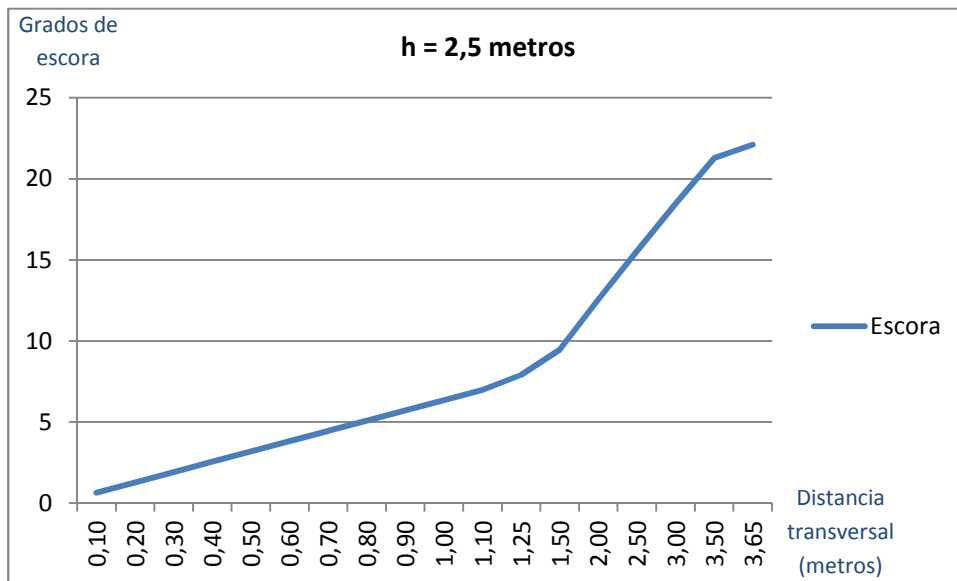
<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(D<sub>F</sub>·h<sub>F</sub>)</b>	<b>θ</b>
0,10	43,42	0,02	1,22
0,20	86,83	0,04	2,44
0,30	130,25	0,06	3,66
0,40	173,66	0,09	4,88
0,50	217,08	0,11	6,09
0,60	260,49	0,13	7,30
0,70	303,91	0,15	8,50
0,80	347,32	0,17	9,69
0,90	390,74	0,19	10,87
1,00	434,15	0,21	12,05
1,10	477,57	0,23	13,21
1,25	542,69	0,27	14,94
1,50	651,23	0,32	17,75
2,00	868,30	0,43	23,11
2,50	1.085,38	0,53	28,08
3,00	1.302,45	0,64	32,63
3,50	1.519,53	0,75	36,76
3,65	1.584,65	0,78	37,91

Con estos valores podemos trazar la curva de evolución de la escora:



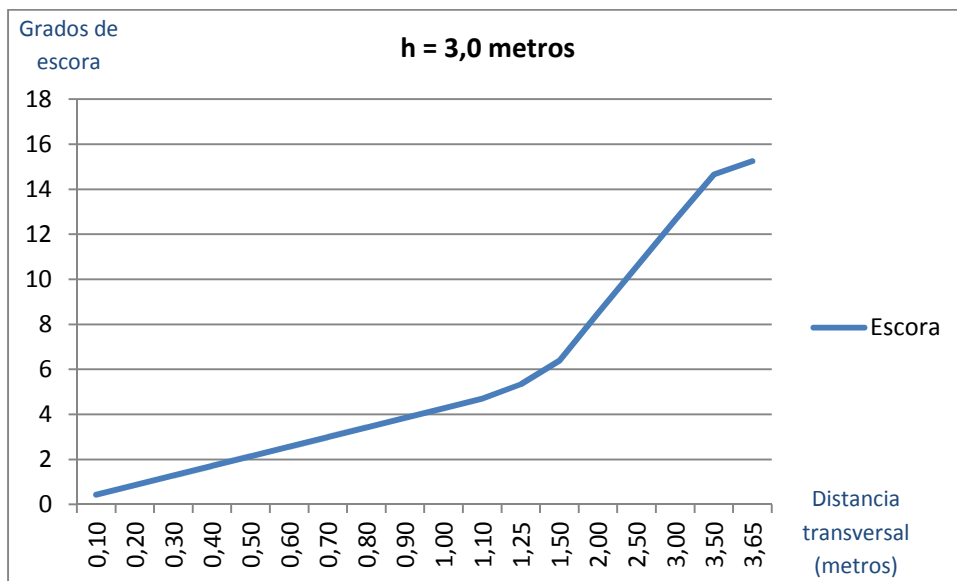
**b. Altura metacéntrica inicial = 2,5 m**

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(D<sub>F</sub>·h<sub>F</sub>)</b>	<b>θ</b>
0,10	43,42	0,01	0,64
0,20	86,83	0,02	1,27
0,30	130,25	0,03	1,91
0,40	173,66	0,04	2,55
0,50	217,08	0,06	3,18
0,60	260,49	0,07	3,82
0,70	303,91	0,08	4,45
0,80	347,32	0,09	5,09
0,90	390,74	0,10	5,72
1,00	434,15	0,11	6,35
1,10	477,57	0,12	6,98
1,25	542,69	0,14	7,92
1,50	651,23	0,17	9,47
2,00	868,30	0,22	12,54
2,50	1.085,38	0,28	15,54
3,00	1.302,45	0,33	18,45
3,50	1.519,53	0,39	21,27
3,65	1.584,65	0,41	22,10



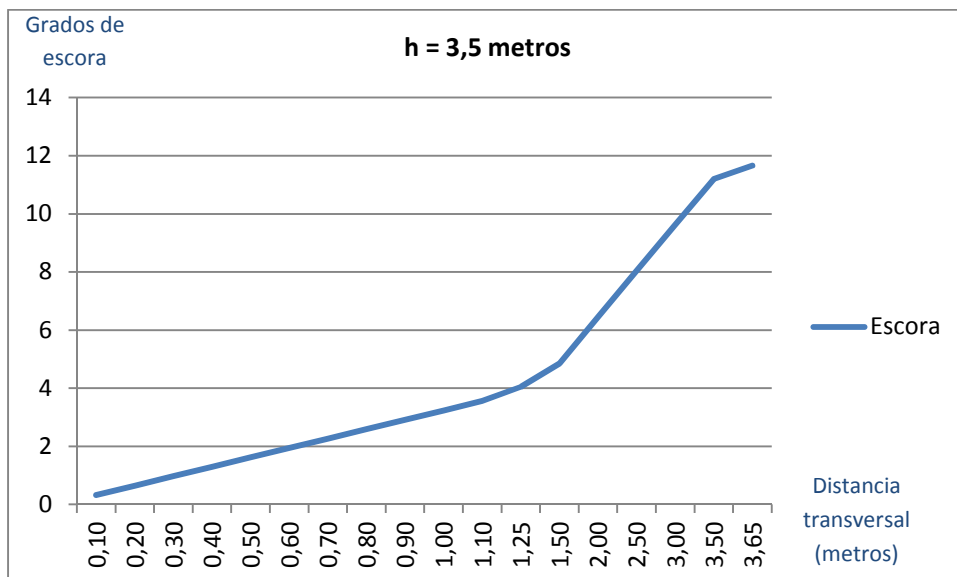
**c. Altura metacéntrica inicial = 3,0 m**

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,01	0,43
0,20	86,83	0,01	0,86
0,30	130,25	0,02	1,28
0,40	173,66	0,03	1,71
0,50	217,08	0,04	2,14
0,60	260,49	0,04	2,57
0,70	303,91	0,05	2,99
0,80	347,32	0,06	3,42
0,90	390,74	0,07	3,85
1,00	434,15	0,07	4,27
1,10	477,57	0,08	4,70
1,25	542,69	0,09	5,33
1,50	651,23	0,11	6,39
2,00	868,30	0,15	8,50
2,50	1.085,38	0,19	10,58
3,00	1.302,45	0,22	12,63
3,50	1.519,53	0,26	14,65
3,65	1.584,65	0,27	15,25



**d. Altura metacéntrica inicial = 3,5 m**

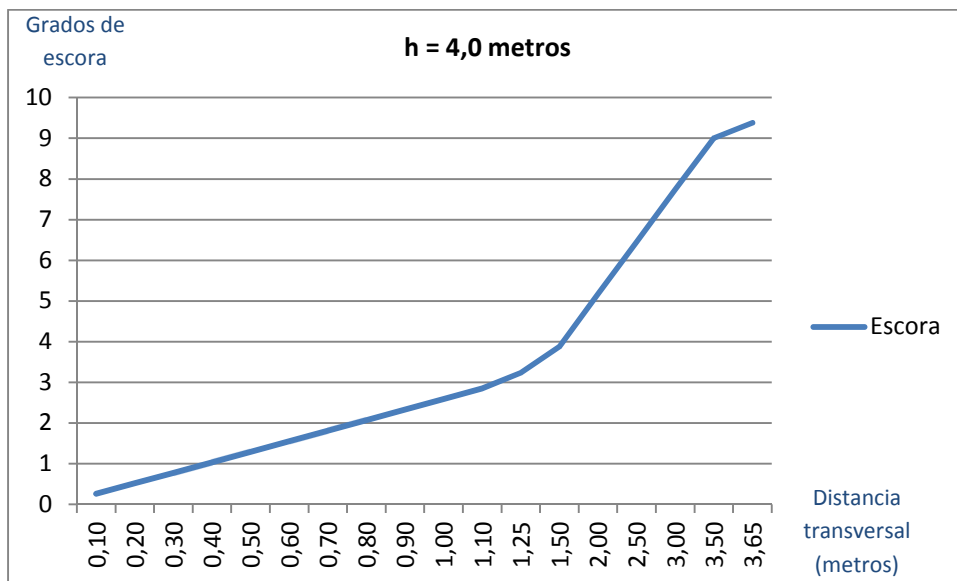
<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,01	0,32
0,20	86,83	0,01	0,65
0,30	130,25	0,02	0,97
0,40	173,66	0,02	1,30
0,50	217,08	0,03	1,62
0,60	260,49	0,03	1,94
0,70	303,91	0,04	2,27
0,80	347,32	0,05	2,59
0,90	390,74	0,05	2,91
1,00	434,15	0,06	3,23
1,10	477,57	0,06	3,56
1,25	542,69	0,07	4,04
1,50	651,23	0,08	4,85
2,00	868,30	0,11	6,45
2,50	1.085,38	0,14	8,04
3,00	1.302,45	0,17	9,62
3,50	1.519,53	0,20	11,19
3,65	1.584,65	0,21	11,66





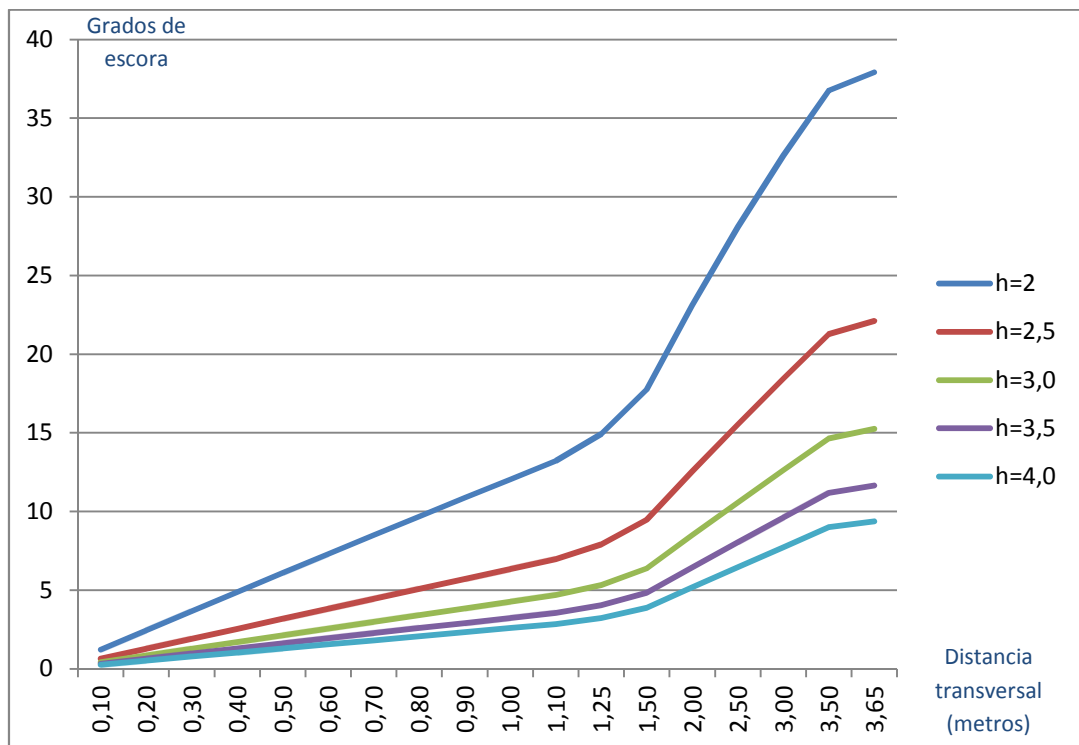
**e. Altura metacéntrica inicial = 4,0 m**

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,00	0,26
0,20	86,83	0,01	0,52
0,30	130,25	0,01	0,78
0,40	173,66	0,02	1,04
0,50	217,08	0,02	1,30
0,60	260,49	0,03	1,56
0,70	303,91	0,03	1,81
0,80	347,32	0,04	2,07
0,90	390,74	0,04	2,33
1,00	434,15	0,05	2,59
1,10	477,57	0,05	2,85
1,25	542,69	0,06	3,24
1,50	651,23	0,07	3,88
2,00	868,30	0,09	5,17
2,50	1.085,38	0,11	6,46
3,00	1.302,45	0,14	7,73
3,50	1.519,53	0,16	9,00
3,65	1.584,65	0,17	9,38



## f- Efecto del movimiento transversal de la grúa sobre la escora

Se representa a continuación en un solo gráfico la variación de la escora en función de la distancia transversal recorrida por el centro de gravedad de la grúa desde la línea de crujía, para las distintas alturas metacéntricas estimadas.



**Figura 32:** Variación de la escora en función de la distancia transversal recorrida por la grúa, para las distintas alturas metacéntricas estimadas. Grúa con cuchara.

Como conclusiones a este apartado podemos confirmar que la estabilidad del buque está muy condicionada por la altura metacéntrica transversal inicial, siendo necesario conocer este dato con antelación al transporte de mercancías de características especiales ya que podría darse el caso, para cargas con elevada altura del centro de gravedad, que resultase demasiado comprometido realizar la operación de carga o descarga de la misma.

Efectivamente, en el caso en que  $h=2$  metros, un desplazamiento transversal de la grúa durante su recorrido hacia popa de 1 metro hacia uno de los

lados del buque con respecto a la línea de crujía provocaría una escora de  $12^\circ$ , la cual no puede ser considerada como aceptable en un proceso de planificación de carga o descarga, por lo que sería recomendable utilizar otro método de carga/descarga u otro buque porteador.

En cualquier caso, otra observación relevante es constatar la sensibilidad del equilibrio del buque en función del movimiento transversal de la grúa, para cualquier valor de altura metacéntrica considerada. Puede observarse que incluso en el caso de mayor estabilidad inicial, es decir, con  $h = 4$  metros, ligeras desviaciones desde la línea de crujía enseguida producen escoras que deben ser tomadas en consideración. Efectivamente, para un desvío equivalente a una distancia transversal de 1 metro, la cual considerando las dimensiones de la grúa y el hecho de que la misma debe ser gobernada en su operación de descarga desde la cabina de mando superior, situando al conductor a una altura superior a los 20 metros y por tanto puede considerarse una desviación que razonablemente puede producirse, produce una escora de casi  $2,6^\circ$ .

### **g- Escora máxima admisible**

Consideraremos a continuación la escora máxima admisible que teóricamente podría asumirse durante la operación de descarga sin comprometer la estabilidad de la grúa.

El ángulo de escora máximo sería el mismo que el ángulo de vuelco de la grúa, el cual ha sido calculado anteriormente:

*Grúa sin base estabilizadora:*

$$\theta_{MAX} = \theta_{gc\ MAX} = 10,08^\circ \text{ (tomando } z_{gc} = 12 \text{ metros)}$$

*Grúa con base estabilizadora:*

$$\theta_{MAX} = \theta_{gp\ MAX} = 30,00^\circ \text{ (tomando } z_{gc} = 12 \text{ metros)}$$

El buque alcanzará dichas escoras en función de la distancia transversal recorrida y que se presenta en la siguiente tabla, para cada altura metacéntrica transversal considerada.

El valor de la escora se obtiene aislando la distancia en la fórmula de la escora:

$$\tan \theta = Mt / (D_F \cdot h_F)$$

y

$$Mt = p \times d$$

Así:

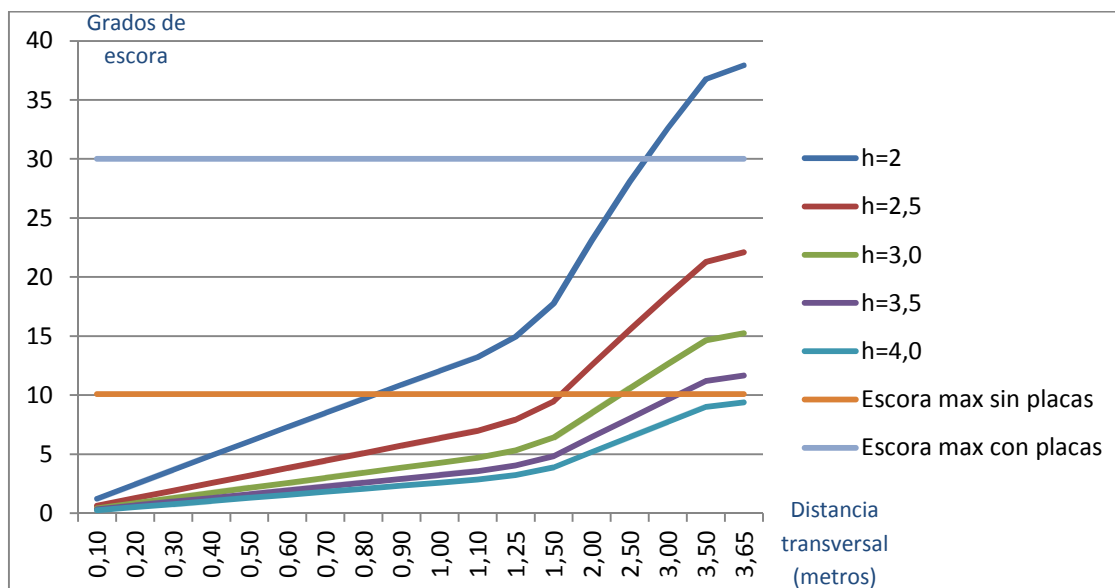
$$d = ( \tan \theta_{MAX} \times (D_F \cdot h_F) ) / p$$

Obteniéndose los siguientes resultados:

<b>h (m)</b>	<b>D<sub>F</sub>·h<sub>F</sub> (Tons x m)</b>	<b>d<sub>gc</sub> MAX (m)</b>	<b>d<sub>gp</sub> MAX (m)</b>
2,0	2.034,50	0,84	2,72
2,5	3.902,90	1,62	5,21
3,0	5.812,80	2,41	7,77
3,5	7.681,20	3,18	10,26
4,0	9.591,10	3,98	12,81

Siendo  $d_{gc \text{ MAX}}$  la distancia transversal máxima que podría recorrer la grúa con la cuchara colgando y sin base de estabilización hasta provocar una escora del buque igual al ángulo de vuelco, y  $d_{gp \text{ MAX}}$  para la situación de grúa con cuchara pero con base de estabilización.

Podemos ver estos resultados gráficamente:



**Figura 33:** Ángulo de escora máximo en función del ángulo de vuelco de la grúa, para situación con base estabilizadora y sin base estabilizadora. Grúa con cuchara.

De este modo se ha podido determinar, para una altura metacéntrica considerada, cual sería la distancia transversal máxima que podría desviarse la grúa en su desplazamiento hacia popa, sin comprometer su propia estabilidad.

De los datos obtenidos, resulta evidente la amplia estabilidad que proporciona la base de estabilización de la grúa, en caso de ser descarga con ésta montada. De hecho, considerando las dimensiones de la grúa con la base de estabilización (anchura = 12 metros) así como la manga del buque ( $M = 16$  m) únicamente sería posible un desplazamiento transversal máximo de la grúa igual a 2 metros desde la línea de crujía sin colisionar con los mamparos laterales de cubierta, por lo que siendo la mínima distancia lateral necesaria para que se produjese el vuelco de la grúa, para  $h = 2$  metros, de 2,72 metros, el vuelco de la grúa nunca podría producirse.

Sin embargo, si se descargase la grúa sin las bases de estabilización, la escora máxima permitida se produciría para distancias de desplazamiento longitudinal desde la línea central que irían de 0,84 metros hasta 3,94 metros, en función de la altura metacéntrica transversal considerada. En esta situación, la posibilidad de vuelco existe para todas las alturas metacéntricas

entre 2,0 y 3,5 metros puesto que físicamente la grúa dispone de espacio suficiente para recorrer una distancia transversal de hasta 3,65 m. En el caso de tener el buque una altura metacéntrica de 4,0 metros, el vuelco no podría producirse al no disponer espacio la grúa para desplazar su centro de gravedad hasta los 3,98 metros necesarios para que se produzca la escora que provocaría el vuelco de la grúa.

## 18- Efecto de la cuchara como peso suspendido sobre la escora

Hemos visto cómo estando la cuchara montada y colgando de la pluma de la grúa disminuye tanto la estabilidad del buque (al disminuir la altura metacéntrica transversal inicial del mismo), como el ángulo de vuelco de la grúa.

Resulta conveniente analizar cuál sería el comportamiento del conjunto buque-grúa en la operación de descarga en caso de ser efectuada sin la cuchara.

En primer lugar se determina la altura metacéntrica final ( $h_{Fsc}$ ). Hemos visto en el apartado 15.b que la cuchara suspendida provoca un efecto de disminución de la altura metacéntrica en -0,16 metros, por lo que si no se monta la cuchara, la altura metacéntrica calculada en el apartado 15.a aumentará en el mismo valor. Es decir que:

$$h_{Fsc} = h_{final} + dh$$

Los coeficientes de estabilidad para esta condición de descarga, es decir, con la grúa dispuesta con la pluma levantada y sin la cuchara colgando serían los siguientes:

<b>h (metros)</b>	<b><math>h_{Fsc}</math> (<math>z_{gc}=12</math>) (metros)</b>	<b><math>D_F \cdot h_F</math> (Tons x metro)</b>
2,0	0,65	2.698,8
2,5	1,10	4.567,2
3,0	1,56	6.477,1
3,5	2,01	8.345,5
4,0	2,47	10.255,4

En este caso, para cada altura metacéntrica considerada, la variación de la escora del buque en función del movimiento transversal de la grúa sería el siguiente:

Para  $h=2,0$  metros:

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,02	0,92
0,20	86,83	0,03	1,84
0,30	130,25	0,05	2,76
0,40	173,66	0,06	3,68
0,50	217,08	0,08	4,60
0,60	260,49	0,10	5,51
0,70	303,91	0,11	6,42
0,80	347,32	0,13	7,33
0,90	390,74	0,14	8,24
1,00	434,15	0,16	9,14
1,10	477,57	0,18	10,03
1,25	542,69	0,20	11,37
1,50	651,23	0,24	13,57
2,00	868,30	0,32	17,83
2,50	1.085,38	0,40	21,91
3,00	1.302,45	0,48	25,76
3,50	1.519,53	0,56	29,38
3,65	1.584,65	0,59	30,42

Para  $h=2,5$  metros:

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,01	0,54
0,20	86,83	0,02	1,09
0,30	130,25	0,03	1,63
0,40	173,66	0,04	2,18
0,50	217,08	0,05	2,72
0,60	260,49	0,06	3,26
0,70	303,91	0,07	3,81
0,80	347,32	0,08	4,35
0,90	390,74	0,09	4,89
1,00	434,15	0,10	5,43
1,10	477,57	0,10	5,97
1,25	542,69	0,12	6,78
1,50	651,23	0,14	8,11
2,00	868,30	0,19	10,76
2,50	1.085,38	0,24	13,37
3,00	1.302,45	0,29	15,92
3,50	1.519,53	0,33	18,40
3,65	1.584,65	0,35	19,13



Para h=3,0 metros:

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,01	0,38
0,20	86,83	0,01	0,77
0,30	130,25	0,02	1,15
0,40	173,66	0,03	1,54
0,50	217,08	0,03	1,92
0,60	260,49	0,04	2,30
0,70	303,91	0,05	2,69
0,80	347,32	0,05	3,07
0,90	390,74	0,06	3,45
1,00	434,15	0,07	3,83
1,10	477,57	0,07	4,22
1,25	542,69	0,08	4,79
1,50	651,23	0,10	5,74
2,00	868,30	0,13	7,64
2,50	1.085,38	0,17	9,51
3,00	1.302,45	0,20	11,37
3,50	1.519,53	0,23	13,20
3,65	1.584,65	0,24	13,75

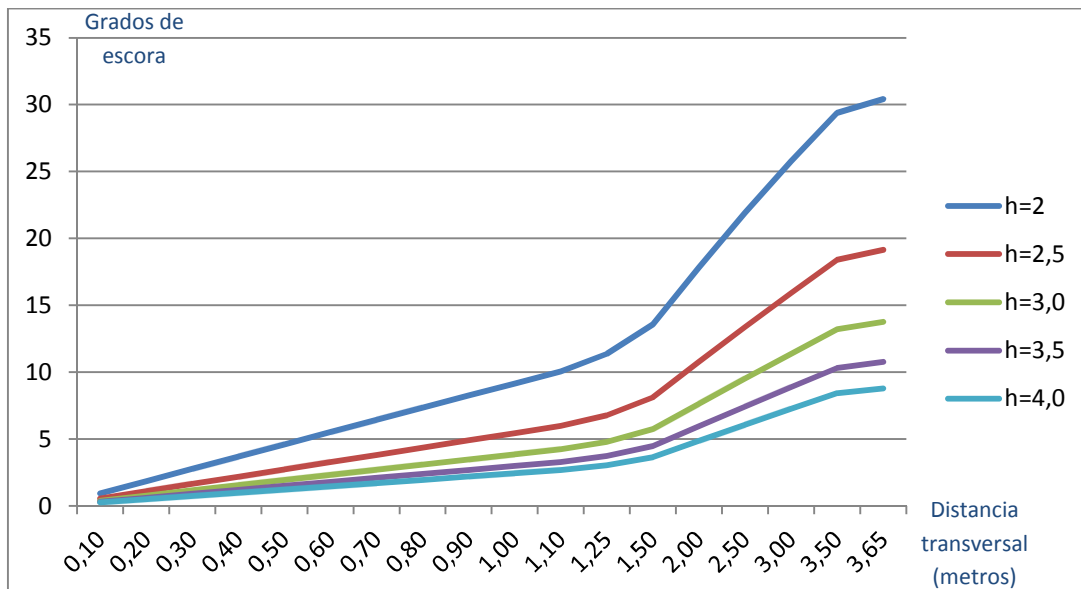
Para h=3,5 metros:

<b>Distancia transversal (metros)</b>	<b>Mt</b>	<b>Mt/(Df.hf)</b>	<b><math>\theta</math></b>
0,10	43,42	0,01	0,30
0,20	86,83	0,01	0,60
0,30	130,25	0,02	0,89
0,40	173,66	0,02	1,19
0,50	217,08	0,03	1,49
0,60	260,49	0,03	1,79
0,70	303,91	0,04	2,09
0,80	347,32	0,04	2,38
0,90	390,74	0,05	2,68
1,00	434,15	0,05	2,98
1,10	477,57	0,06	3,28
1,25	542,69	0,07	3,72
1,50	651,23	0,08	4,46
2,00	868,30	0,10	5,94
2,50	1.085,38	0,13	7,41
3,00	1.302,45	0,16	8,87
3,50	1.519,53	0,18	10,32
3,65	1.584,65	0,19	10,75

Para  $h=4,0$  metros:

Distancia transversal (metros)	Mt	Mt/(Df.hf)	$\theta$
0,10	43,42	0,00	0,24
0,20	86,83	0,01	0,49
0,30	130,25	0,01	0,73
0,40	173,66	0,02	0,97
0,50	217,08	0,02	1,21
0,60	260,49	0,03	1,46
0,70	303,91	0,03	1,70
0,80	347,32	0,03	1,94
0,90	390,74	0,04	2,18
1,00	434,15	0,04	2,42
1,10	477,57	0,05	2,67
1,25	542,69	0,05	3,03
1,50	651,23	0,06	3,63
2,00	868,30	0,08	4,84
2,50	1.085,38	0,11	6,04
3,00	1.302,45	0,13	7,24
3,50	1.519,53	0,15	8,43
3,65	1.584,65	0,15	8,78

Representando las variaciones de escora para las distintas alturas metacéntricas en una sola gráfica:



**Figura 34:** Variación de la escora en función de la distancia transversal recorrida por la grúa, para las distintas alturas metacéntricas estimadas. Grúa sin cuchara.

Los resultados obtenidos confirman la mayor estabilidad del buque cuando la grúa no ha sido montada con su cuchara, ya que para una misma distancia de separación de su centro de gravedad con respecto a la línea de crujía del buque, el ángulo de escora que se produce es menor.

*Escora máxima y distancia transversal máxima admisible*

Se calcula a continuación la escora máxima admisible para la situación en la cual la grúa se descarga sin la cuchara y sin la base de estabilización, puesto que anteriormente hemos visto que si ésta última se encuentra montada no puede producirse el vuelco de la grúa al no poderse alcanzar la distancia transversal mínima para producir la escora de vuelco de la grúa.

Recordamos que el ángulo de vuelco de la grúa sin cuchara ( $\theta_{g\ sc\ MAX}$ ) ha sido determinado anteriormente en el apartado 15-b y que la escora máxima admisible es igual a dicho ángulo, por lo que:

$$\theta_{MAX} = \theta_{g\ sc\ MAX} = 11,38^\circ$$

Podemos finalmente calcular la distancia transversal máxima para esta condición, obteniendo los siguientes valores:

<b>h (m)</b>	<b>D<sub>F</sub>.h<sub>F</sub> (Tons x m)</b>	<b>d<sub>g sc MAX</sub> (m)</b>
2,0	2.698,80	1,24
2,5	4.567,20	2,10
3,0	6.477,10	2,98
3,5	8.345,50	3,84
4,0	10.255,40	4,72

Podemos concluir, comparando estos valores con los obtenidos en los cálculos efectuados para la situación en la cual la cuchara está colgando de la pluma, que la situación sin pluma ofrece un margen de desplazamiento transversal de la grúa en su movimiento hacia popa considerablemente mayor, aportando por tanto mayor seguridad a la operación de descarga:

<b>h (m)</b>	<b>d<sub>gc</sub> MAX (m)</b>	<b>d<sub>g sc</sub> MAX (m)</b>	<b>△ (m)</b>
2,0	0,84	1,24	+0,40
2,5	1,62	2,10	+0,48
3,0	2,41	2,98	+0,57
3,5	3,18	3,84	+0,66
4,0	3,98	4,72	+0,74

Así pues, la opción de descargar la grúa sin la cuchara colgando ofrece un margen de maniobra mayor al permitir un desplazamiento del centro de gravedad de la misma con respecto a la línea central superior a la situación en la cual la cuchara estuviese colgando, que varía entre +0,40 metros y 0,74 metros en función de la altura metacéntrica inicial del buque.

La magnitud de esta distancia es suficientemente importante para plantearse, ahora sí, la conveniencia de descargar la grúa con o sin su cuchara colgando de la pluma.

En este sentido, en caso de descargar la grúa sin la cuchara, tenemos que para las alturas metacéntricas  $h=3,5$  metros y  $h=4$  metros, no podría producirse una situación que significase un posible vuelco de la grúa, ya que siendo el recorrido en sentido transversal máximo que físicamente puede efectuar la grúa igual a 3,65 metros, para dichas alturas metacéntricas no se alcanzaría la distancia necesaria para crear la escora que provocase el vuelco de la grúa.

## **19- Efecto de los tanques estabilizadores**

Para garantizar el éxito de la operación de descarga será necesario conocer en qué condición se encuentran los tanque de lastre antes de iniciar la misma. Efectivamente, hemos visto que la condición ideal del buque para efectuar la descarga es la de calado máximo, sin escora y sin asiento. Para dejar el buque en estas condiciones será necesario utilizar los tanques de lastre, puesto que incluso si ésta fuese la condición del buque una vez cargada la mercancía en el puerto de origen, a lo largo del viaje marítimo se habrán producido consumos de combustible, aceite o agua dulce, que habrán modificado la situación de partida.

Si conocemos la situación en la que se encuentran los tanques, podrán tomarse las decisiones adecuadas sobre los mismos a lo largo de la operación de descarga.

Efectivamente, en caso de que el buque haya requerido lastre para dejarlo adrizado y en sus calados máximos previamente al inicio de la descarga y resultase necesario utilizar el lastre a lo largo de la descarga para corregir una posible escora, deberemos conocer perfectamente la situación inicial de los lastres para evitar, tal y como hemos indicado en el apartado 6, efectos sumadores de escora al combinarse escora producida por el lastre y escora producida por el movimiento transversal de la grúa.

### *Uso de los tanques de lastre durante la operación de descarga*

Recordamos que los tanques de lastre únicamente pueden ser utilizados en modo manual y que no disponen de sondas manuales, por lo que la determinación de la cantidad de agua de lastre bombeada debe efectuarse mediante control de tiempos de trasiego.

De este modo, y considerando que la capacidad de las dos bombas de lastre instaladas a bordo tienen una capacidad de 500 m<sup>3</sup>/h cada una, o lo que es lo mismo 8,3 m<sup>3</sup>/min, puede estimarse que el tiempo necesario para corregir una escora de 1º provocada por el movimiento transversal de la grúa, serían necesarios aproximadamente 30 segundos de bombeo de agua de lastre.

Considerando estos tiempos se alcanza la conclusión de que, en caso de resultar oportuno el uso de los tanques de lastre para compensar una escora producida por el movimiento transversal de la grúa, sería necesario que ésta quedase parada durante el tiempo de bombeo necesario, hasta dejar el buque con escora nula.

## 20- Planificación de la operación de descarga

### *Aspectos preliminares*

Para realizar el estudio de estabilidad del buque y de la grúa se ha considerado que ésta se encontraba estibada de modo que la posición de su centro de gravedad coincidía con la línea central del buque. También resulta importante conocer la posición de atraque del buque, el calado mínimo de la zona de traque, y las condiciones meteorológicas existentes.

En relación con la condición de trimado del buque, éste deberá dejarse en la situación de estabilidad máxima, correspondiente a un calado igual al calado en máxima carga, sin asiento y sin escora.

### *Ángulo de vuelco de la grúa*

A continuación se ha calculado el ángulo de vuelco de la grúa, correspondiente a tres condiciones de descarga y estimando distintas alturas del centro de gravedad de la grúa:

- Grúa con cuchara y sin base de estabilización:  $\theta_{g \text{ MAX}} \approx 10^\circ$
- Grúa sin cuchara y sin base de estabilización:  $\theta_{g \text{ MAX}} \approx 11^\circ$
- Grúa con cuchara y con base de estabilización:  $\theta_{g \text{ MAX}} \approx 30^\circ$

Estos cálculos han permitido confirmar que la estabilidad de la grúa con su base de estabilización montada es ampliamente superior a la condición en la cual ésta estuviese desmontada, así como que el hecho de encontrarse la cuchara colgando disminuye la estabilidad de la grúa, aunque el valor de su ángulo de vuelco con o sin cuchara no tiene una variación significativa.

### *Altura metacéntrica del buque tras la carga de la grúa*

Tratándose de un dato de gran importancia para el análisis de estabilidad del buque, se ha supuesto que el valor de la altura metacéntrica transversal inicial del buque es un dato no disponible, optándose por estimar dicho parámetro considerando un abanico de valores.

Al tratarse de una carga pesada cuyo peso aproximadamente se corresponde con el 10% del desplazamiento del buque, y con una elevada altura de su centro de gravedad, se ha comprobado cómo varía la altura metacéntrica transversal del buque tras efectuarse la carga, disminuyendo.

Asimismo, se ha comprobado la relevancia de la determinación de la altura del centro de gravedad de la grúa, dado el impacto de ésta en la posición

final de la altura metacéntrica del buque y por tanto de la estabilidad del mismo.

#### *Efecto de la cuchara como peso suspendido*

La descarga de la grúa con su cuchara colgando de la pluma provoca un doble efecto: por un lado disminuye la estabilidad del buque al disminuir su altura metacéntrica transversal, y produce una disminución de la estabilidad de la grúa al disminuir su ángulo de vuelco.

#### *Coefficiente de estabilidad y variación de la escora*

Con todos estos datos se ha podido definir la variación de la escora del buque en función de la distancia transversal que recorriese la grúa desde la línea central del buque en su movimiento hacia popa, para las distintas alturas metacéntricas consideradas.

#### *Distancia máxima de desplazamiento transversal de la grúa*

Finalmente, se ha calculado cual sería la distancia transversal que como máximo podría separarse la grúa en relación con la línea central del buque durante su desplazamiento hacia popa, para las tres condiciones de descarga de la grúa y los distintos valores de la altura metacéntrica transversal inicial considerados, obteniéndose los siguientes resultados:

- Grúa con cuchara y sin base de estabilización: la grúa podría separarse de la línea central entre 0,84 m para  $h=2,0$  m y 3,9 m para  $h=4,0$  metros. Existiría riesgo de vuelco de la grúa para  $2,0 < h < 4,0$ .
- Grúa con cuchara y con base de estabilización: la grúa podría separarse de la línea central entre 2,7 m para  $h=2,0$  m y 12,8 m para  $h=4,0$  metros. Debido a las dimensiones de la base de estabilización y la manga del buque, físicamente no podría darse una situación en la que existiese riesgo de vuelco de la grúa.
- Grúa sin cuchara y sin base de estabilización: la grúa podría separarse de la línea central entre 1,24 m para  $h=2,0$  m y 4,72 m para  $h=4,0$  metros. Existiría riesgo de vuelco de la grúa para  $2,0 < h < 3,5$ .

### *Uso de los tanques de lastre*

Como aspecto final a considerar, se ha analizado la posibilidad de uso de los tanques de lastre para corregir la escora que pudiese producirse como consecuencia de desviarse la grúa de la línea central del buque en su desplazamiento hacia popa, alcanzándose la conclusión que resultaría conveniente detener el movimiento de la grúa durante la operación de bombeo hasta dejar el buque sin escora.

### *Otros aspectos a considerar*

Para tomar una decisión final con respecto a la forma en la que debería planificarse la operación de descarga deberán tomarse en consideración aspectos operativos, como son la altura de la cabina de mando, situada aproximadamente a unos 20 metros de altura sobre el suelo, hecho el cual supone una gran dificultad a la hora de asegurar un movimiento lo más recto posible de la grúa sin que se produzcan desplazamientos transversales, por lo que, dicho de otra forma, se debería contemplar la posibilidad de que efectivamente dichos movimientos se produzcan.

También deberá evaluarse la capacidad de la grúa para moverse a velocidades muy pequeñas, ya que cuanto mayor sea la capacidad del sistema propulsor de la grúa para desplazarse a velocidades pequeñas menor será la distancia mínima recorrida entre una arrancada y un paro, así como la capacidad de giro del sistema directriz de la grúa.

En este sentido, considerando los mencionados aspectos operativos, a los que podrían añadirse aspectos externos que no han sido considerados como la existencia de viento u oleaje provocado por la navegación de otro buque en las cercanías a la zona de atraque, debería considerarse, a efectos de planificación, la posibilidad de que en el transcurso del desplazamiento de la grúa hacia popa, ésta sufra desvíos con respecto a la línea de crujía de por lo menos 1 metro.

### *Planificación de la operación de descarga recomendada*

De acuerdo con todos los aspectos revisados, el autor considera que debería asegurarse la condición de mayor seguridad para la descarga, priorizando este aspecto frente a cualquier otra consideración, como podría ser el tiempo y medios necesarios para llevarla a cabo.



#### a) Condición de descarga de la grúa

La grúa debería descargarse sin la cuchara colgando de la pluma, puesto que en esta condición es mayor el movimiento transversal permisible sin comprometer su propia estabilidad.

También resultaría recomendable efectuar la descarga con la base de estabilización montada. Tal como hemos visto, los posibles movimientos transversales de la grúa nunca llegarían a ser lo suficientemente grandes para crear una escora que pusiese en riesgo la estabilidad de la grúa.

Sin embargo, deberán tenerse en cuenta dos aspectos: por un lado, el espacio libre en sentido transversal que ofrece la grúa con su base es de 2 metros en cada lado con respecto a la manga del buque, los cuales deberían ser suficientes para asegurar la no colisión contra los mamparos laterales de la cubierta, y por otro, que la anchura de la rampa de descarga no permite la salida de la grúa con la base de estabilización, ni siquiera aprovechando la posibilidad que ofrece el buque de abatir o desmontar la chimenea, ampliando así el espacio de salida, ya que la mayor amplitud se produce a partir de una altura de 1 metro sobre cubierta.

Por todo ello, la grúa debería descargarse con su base de estabilización montada hasta llegar a la rampa de salida en popa, momento en el que la base debería desmontarse para finalizar la salida de la grúa.

#### b) Operativa de descarga

Para asegurar el éxito de la operación de descarga, debería asegurarse que la grúa se desvía en sentido transversal lo menos posible de la línea central durante su movimiento hacia popa.

Una medida inicial consistiría en trazar una línea paralela a la línea central del buque sobre cubierta, con un grosor y color adecuados para que ésta sirviese como referencia de la dirección a seguir por parte del conductor de la grúa.

El movimiento de la grúa debería ser controlado por personal situado a nivel de cubierta para poder apreciar los posibles desvíos en sentido transversal que sufriese la grúa, trasladando esta información por radio de forma continuada.

#### c) Corrección de escoras

Asimismo, deberá asegurarse que la posible escora que pueda alcanzar el buque está controlada para ser corregida.

En este sentido, una buena práctica consistiría en corregir pequeños desvíos de la grúa con respecto a la línea central del buque, inferiores a 1 metro, mediante la corrección de la dirección de desplazamiento de la grúa y con velocidades y radios de giro pequeños.

Efectivamente, el impacto sobre la escora del buque para un desvío transversal de la grúa de hasta 1 metro depende del valor de la altura metacéntrica transversal inicial del buque considerado. Así, para la condición de descarga de la grúa, tendríamos que dicho desvío provocaría una escora de  $2,4^\circ$  para  $h=4,0$  metros hasta  $9,1^\circ$  para  $h=2,0$  metros.

Para desplazamientos superiores a 1 metro sería recomendable detener el movimiento de la grúa, dotarla de su máxima estabilidad mediante el uso de la base de estabilización, y corregir la escora producida por medio de los tanques de lastre.

Una vez recuperada la escora de  $0^\circ$ , la base de estabilización se levantaría, y la grúa corregiría su trayectoria hasta alcanzar la posición transversal coincidente con la línea de crujía, hecho el cual provocaría de nuevo una escora igual a la corregida con el anterior uso de los lastres pero en el lado contrario. Consecuentemente, debería volver a detenerse la grúa, estabilizarla con la base y corregir la escora, de modo que volvería a tenerse una situación de centro de gravedad de la grúa situado sobre la línea central del buque y escora nula.

Este procedimiento debería repetirse tantas veces como desvíos transversales superiores a 1 metro se produjesen durante el desplazamiento de la grúa hacia popa.

La salida de la grúa por la rampa de popa constituiría un momento crítico dentro de la secuencia de descarga, puesto que al ser necesario desmontar la base de estabilización, la grúa adoptaría un ángulo de vuelco notablemente menor (aprox.  $11^\circ$ ). De hecho, para el caso de que la altura metacéntrica inicial real del buque fuese  $h=2,0$  m, tendríamos que la distancia de desvío máximo permitido de la grúa en sentido transversal con respecto a la línea de crujía sería de tan solo 1,2 metros, por lo que buque y método de descarga no resultarían idóneos para este tipo de mercancía.

## 21- Situación real acaecida durante la operación de descarga

Tal como se ha anunciado desde el inicio, la segunda parte de este trabajo está basada en datos reales y en una situación real en la se cargó la grúa sobre la cubierta del buque porteador, se efectuó el transporte marítimo, y debía ser descargada en destino.

Se presenta a continuación una serie de fotografías que ilustran lo sucedido durante la secuencia de descarga:





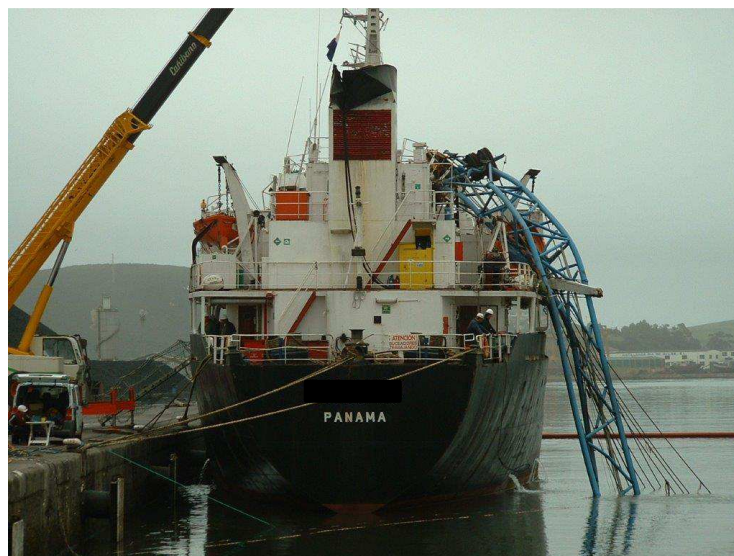


**Figura 35:** Secuencia del vuelco de la grúa durante la operación de descarga

Tal como puede observarse en las fotografías, la situación real que aconteció durante la descarga de la grúa constituyó una grave fatalidad ya que se produjo una fuerte escora hacia el lado de babor, inclinándose la grúa hacia el mismo lado hasta alcanzar el ángulo de vuelco y produciéndose por tanto su caída.

Como consecuencia de la caída se produjo el lamentable fallecimiento del operador de la grúa, situado en el interior de la cabina de control ubicada en la superestructura de la misma.

Adicionalmente, se dio la circunstancia de que otro buque, concretamente un buque tanque, se encontraba atracado cerca del buque porteador, cayendo la pluma de la grúa sobre el mismo y colisionando fuertemente contra su superestructura de habilitación, causando importantes daños a la misma, si bien afortunadamente sin causar heridos en dicho buque.



**Figura 36:** Daños producidos al buque tanque por colisión de la pluma de la grúa.

Como consecuencia del vuelco de la grúa, ésta resulto gravemente dañada, quedando totalmente inutilizable, así como también resultaron gravemente dañados diversos elementos de la cubierta del buque porteador.



**Figura 36:** Posición final de la grúa y buque tras producirse el vuelco de la grúa

*Comentarios acerca de las posibles causas del vuelco de la grúa*

A pesar de que el objetivo del presente trabajo no es el de analizar las causas que provocaron el vuelco de la grúa durante la operación real de descarga de la misma, resulta ilustrativo realizar unos breves comentarios al respecto para confirmar algunos de los aspectos analizados en el proyecto.

Los aspectos más relevantes que pueden ser destacados son los siguientes:

- La operación de descarga se efectuó sin montar la base de estabilización de la grúa y con la cuchara colgando de la pluma. Tal como hemos podido comprobar en el trabajo, ésta se corresponde con la condición de menor estabilidad del buque.

- En esta condición, el ángulo de vuelco de la grúa se establece en  $10^\circ$ , alcanzando el buque dicha escora cuando la grúa se desvía transversalmente de la línea central del buque entre 3,98 m para  $h=4,0$  m y 0,84 m para  $h=2,0$  m.
- Podría haber ocurrido como situación inicial a la descarga, que la grúa no estuviese razonablemente bien posicionada sobre cubierta, es decir, manteniendo una simetría de pesos en el plano transversal con respecto a la línea de crujía del buque. De ser así, probablemente se habrían utilizado los tanques de lastre para dejar el buque con escora igual a cero, debiendo ser dicha circunstancia tenida en cuenta al planificar la descarga.
- Probablemente el movimiento de la grúa en dirección a popa no se efectuó con las debidas precauciones, es decir, evitando que la trayectoria de la misma se separase sustancialmente (por ejemplo, más de 1 metro) con respecto a la línea de crujía.
- Podría darse también la circunstancia de que los tanques de lastre hubiesen sido utilizados para corregir escoras del buque a lo largo del desplazamiento de la grúa hacia popa y un posible uso poco cuidadoso de los mismos hubiese podido provocar un efecto sumador de escoras según lo expuesto en el apartado 11.
- También podría haber sucedido que la corrección de las escoras no se hubiese efectuado con la debida diligencia, tal como se ha propuesto en este trabajo, es decir, deteniendo la grúa para desvíos transversales de la misma con respecto al eje de crujía superiores a 1 metro, para estabilizar el buque y resituando cuidadosamente la grúa sobre la línea de crujía.
- Todo ello podría haber provocado un movimiento de balanceo del buque hacia un lado, por ejemplo hacia babor, desplazándose la grúa para tratar de estabilizar el buque hacia estribor, superando la línea de crujía ahora hacia estribor, lo cual unido a un posible uso poco preciso del lastre hubiese provocado escoras cada vez más importantes, hacia un costado y hacia el otro, hasta producirse el vuelco de la grúa.
- Adicionalmente, podría haberse producido un efecto que no ha sido objeto de análisis en el presente trabajo, consistente en la posibilidad de que alcanzado un determinado grado de escora, si bien menor al ángulo de vuelco de la grúa, ésta derrapase sobre la cubierta del buque, continuando por tanto su desplazamiento transversal y separán-



dose de forma descontrolada de la línea de crujía, incrementado por tanto la escora del buque.

- Indicar finalmente que se desconoce la altura metacéntrica transversal inicial del buque, por lo que incluso podría llegar a darse la situación que dicho buque no resultase adecuado o suficientemente seguro para la carga/descarga y transporte de esta mercancía, de acuerdo con sus características.
- No obstante, la posición final en la que permanece el buque tras el vuelco de la grúa parece indicar que el mismo tuvo estabilidad suficiente durante toda la operación de descarga y caída de la grúa, ya que de lo contrario se habría producido su vuelco, hundiéndose.

Con independencia de las causas que provocaron el vuelco de la grúa, esta circunstancia nos permite afirmar que la descarga de la misma constituye una operación compleja y delicada que requiere de una buena planificación así como una posterior ejecución adecuada. No obstante, de acuerdo con el análisis efectuado, no parece razonable que la grúa se descargase desprovista de su base de estabilización y con la cuchara colgando de su pluma, puesto que dicha situación constituye la condición de menor estabilidad del buque y de la grúa.

## CONCLUSIONES

## **22- Conclusiones**

### **a. Aspectos generales**

El presente trabajo permite ratificar una afirmación efectuada en los primeros párrafos del mismo, que es la complejidad analítica vinculada a la determinación de la estabilidad de un buque cuando éste es sometido a determinadas fuerzas externas, como podría ser la carga/descarga de una carga rodada con un elevado peso.

Son necesarios efectuar distintos cálculos para llegar a disponer de información relevante que permita entender con cierta precisión cual va a ser el comportamiento del conjunto buque y carga durante la operación considerada, en este caso, la operación de descarga, y poder valor así sus riesgos y las precauciones que deberían ser tomadas.

La secuencia de análisis podría resumirse del siguiente modo:

- 1) Obtención de datos del buque porteador y su carga.
- 2) Cálculo del ángulo de vuelco de la grúa para las distintas condiciones de descarga consideradas.
- 3) Determinación de la altura metacéntrica transversal del buque tras la carga.
- 4) Efecto de la cuchara de la grúa como peso suspendido.
- 5) Coeficiente de estabilidad y variación de la escora.
- 6) Cálculo de la distancia máxima de desplazamiento transversal de la grúa con respecto a la línea de crujía.
- 7) Uso de los tanques de lastre.
- 8) Consideración de aspectos operativos.

Adicionalmente a la complejidad de desarrollo del modelo matemático, debe añadirse el hecho de que en la realidad probablemente no se dispone de toda la información necesaria para realizar los cálculos con la exactitud deseada, siendo necesario efectuar aproximaciones y asumir ciertas hipótesis.

Efectivamente, a lo largo del trabajo ha sido necesario asumir las siguientes suposiciones:

- Altura metacéntrica transversal inicial del buque.
- Altura del centro de gravedad de la grúa.
- Buque perfectamente adrizado, sin escora ni asiento, y en sus calados máximos.
- Grúa correctamente dispuesta con su centro de gravedad situado sobre la línea central del buque.
- No existencia de olas ni viento.

Adicionalmente, el trabajo se ha centrado en la estabilidad estática transversal. Se ha considerado que, si bien la operación analizada producía un efecto tanto en la estabilidad transversal como en la longitudinal del buque, es en el plano transversal que la estabilidad del buque y de la carga puede verse comprometidas.

No obstante, la estabilidad longitudinal estaría afectada por los siguientes elementos:

- La rampa de salida.
- La inclinación de la rampa de salida para la descarga.
- La marea, que modificaría la inclinación de la rampa.
- La grúa al moverse de proa hacia popa provocaría una alteración apopante, es decir, disminuiría el calado de proa y aumentaría el calado de popa, variando la inclinación de la rampa.
- Actuación sobre los tanques de trimado, modificando el asiento del buque.

### **b. Resultados obtenidos**

El trabajo realizado ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

- La carga de un peso elevado modifica el desplazamiento del buque, modificando la posición de su centro de gravedad y de su centro de carena.
- Si el peso se carga de forma que su centro de gravedad coincide en el plano transversal con la línea central del buque, únicamente deberá considerarse la variación vertical del centro de gravedad y centro de carena.
- La altura metacéntrica transversal inicial es un dato de absoluta relevancia y representa la estabilidad estática del buque. Así, un buque se encontrará en equilibrio estable siempre que la altura metacéntrica sea positiva.
- La carga de un peso por encima de un plano, denominado plano límite y que coincide muy aproximadamente con la línea de flotación del buque, es decir, con el calado del mismo, produce una variación negativa de la altura metacéntrica. Consecuentemente, la estabilidad del buque disminuirá.
- La posición final de la altura metacéntrica estará afectada por el peso de la carga y por la posición vertical de su centro de gravedad. En el caso estudiado, el hecho de descargar la grúa con o sin cuchara col-

gando de la pluma tiene un impacto en la posición vertical de su centro de gravedad. En este sentido, la cuchara actúa como peso suspendido, disminuyendo la altura metacéntrica transversal del buque.

- Al variar el coeficiente de estabilidad varía también la escora del buque, aumentando los grados de escora producidos por un mismo momento.
- El desplazamiento de la grúa en el plano horizontal produce una escora del buque que aumenta a medida que la distancia se incrementa, alcanzando potencialmente escoras que comprometerían la estabilidad de la grúa.
- Conociendo el ángulo de vuelco de la grúa, puede calcularse la escora máxima admisible y la posición transversal del centro de gravedad de la grúa que produciría dicha escora, determinando por tanto la distancia máxima que la grúa podría separarse de la línea central del buque en su desplazamiento hacia popa.
- Los tanques de lastre pueden ser utilizados para corregir posibles escoras tomadas por el buque, siendo necesario conocer su modo de operación, condición, capacidades y caudal de las bombas.

### **c. Utilización de datos reales**

El uso de datos reales ha dotado de valores concretos a las dimensiones analizadas teóricamente, permitiendo entender mejor el impacto de todos los aspectos analizados.

De este modo, ha podido comprobarse el impacto que tendrían distintas alturas metacéntricas del buque, o distintas alturas del centro de gravedad de la carga.

También ha resultado ilustrativo cuantificar el efecto de la cuchara de la grúa como peso suspendido, disminuyendo la altura metacéntrica del buque así como disminuyendo también el ángulo de vuelco de la grúa, si bien obteniendo unos valores de su variación con respecto a la condición de descarga sin cuchara, que probablemente no resultaban definitivos para poder tomar una decisión con respecto a sus consecuencias a nivel operativo.

Finalmente, el análisis de la variación de la escora en función de la distancia transversal que podría recorrer la grúa en su desplazamiento hacia popa ha aportado una visión más concreta del efecto que produciría la descarga de la grúa con o sin cuchara, y con su base de estabilización montada o desmontada. Esta información ha permitido definir la condición en la cual la

grúa debía ser descargada (sin cuchara y con su base estabilizadora montada y operativa, hasta llegar a la rampa de popa), atendiendo a criterios de seguridad para las personas y las cosas.

Adicionalmente, esta última información podría llegar a ser concluyente en relación con la idoneidad del buque porteador o del método de carga/ descarga propuesto para el transporte de esta carga.

#### **d. Situación real acaecida durante la operación de descarga**

Conocer la situación real producida en la descarga de la grúa confirma la relevancia de efectuar un análisis detallado de la estabilidad del buque y de la carga, así como una ejecución posterior correcta. Como ha podido observarse, las consecuencias de una deficiente planificación y/o ejecución pueden ser de grandes dimensiones, llegando a tener que lamentar accidentes afectando a las personas o daños materiales de cuantioso valor económico.

Efectivamente, la operación de un buque conlleva la toma de diversas decisiones relevantes. Con estas decisiones, se busca alcanzar el destino y finalizar el viaje a tiempo, evitando situaciones de peligro. En realidad, estas decisiones definen un balance entre seguridad y eficiencia, entre éxito financiero y riesgo para las vidas humanas. El nivel en el cual se establece dicho balance es dependiente de un número de factores enorme, incluyendo criterios económicos y juicio humano. El criterio humano es el factor más significativo en el área de la estabilidad.

Por otro lado, tras producirse un siniestro de estas características deberán analizarse las causas concretas del vuelco de la grúa, así como valorar las lesiones a las personas y los daños materiales. Todo ello conllevará la determinación de responsabilidades que podrían incluir responsabilidades penales, debiendo ser probablemente determinadas en sede judicial debido a la complejidad que hemos podido comprobar a lo largo del trabajo.

En este sentido, y tan solo como muestra final de la complejidad que puede suponer determinar las responsabilidades del siniestro, se enumeran a continuación las distintas partes intervinientes en el transporte marítimo que ha sido estudiado:

- Propietarios de la mercancía
- Cargadores e Ingenierías
- Estibadores en la operación de carga
- Armadores / propietarios del buque
- Operadores del buque
- Estibadores en la operación de descarga
- Consignatarios del buque y subcontratistas
- Compañías de Seguros



## Relación de figuras

<b>Figura 1:</b> Plano diametral del buque	8
<b>Figura 2:</b> Plano transversal del buque	8
<b>Figura 3:</b> Calado en aguas iguales	9
<b>Figura 4:</b> Asiento	9
<b>Figura 5:</b> Centro de carena	9
<b>Figura 6:</b> Fotografías ilustrativas de buques semi-sumergibles para transporte de cargas pesadas	13
<b>Figura 7:</b> Fotografías ilustrativas de buques no semi-sumergibles para cargas pesadas	13
<b>Figura 8:</b> Fotografías ilustrativas de la tipología de carga considerada	14
<b>Figura 9:</b> Esquema representando la estiba de la mercancía y posición de atraque del buque. Plano longitudinal y plano de la cubierta principal.	15
<b>Figura 10:</b> Variación vertical del centro de gravedad por la carga de un peso	16
<b>Figura 11:</b> Variación transversal del centro de gravedad por la carga de un peso	16
<b>Figura 12:</b> Variación longitudinal del centro de gravedad por la carga de un peso	17
<b>Figura 13:</b> Variación vertical del centro de gravedad por el traslado de un peso	17
<b>Figura 14:</b> Movimiento transversal del centro de gravedad por el traslado de un peso	17
<b>Figura 15:</b> Movimiento longitudinal del centro de gravedad por el traslado de un peso	18
<b>Figura 16:</b> Inclinación sobre el plano transversal – Escora	18
<b>Figura 17:</b> Inclinación sobre el plano longitudinal – Asiento	18
<b>Figura 18:</b> Variación del centro de carena al cargar un peso	19



<b>Figura 19:</b> Variación del centro de carena al trasladar transversalmente un peso	19
<b>Figura 20:</b> Variación del centro de carena al trasladar longitudinalmente un peso	20
<b>Figura 21:</b> Variación vertical del centro de gravedad por la carga de un peso	23
<b>Figura 22:</b> Variación del centro de carena al cargar un peso	25
<b>Figura 23:</b> Metacentro transversal	27
<b>Figura 24:</b> Coeficiente de estabilidad	28
<b>Figura 25:</b> Variación del centro de carena al trasladar transversalmente un peso	34
<b>Figura 26:</b> Desplazamiento transversal máximo de la grúa	35
<b>Figura 27:</b> Planos del buque porteador	42
<b>Figura 28:</b> Vista aérea del buque porteador	43
<b>Figura 29:</b> Vista lateral del buque porteador	43
<b>Figura 30:</b> Fotografías de una grúa de características similares a la transportada	47
<b>Figura 31:</b> Esquema de la grúa transportada	47
<b>Figura 31:</b> Brazo máximo correspondiente al desplazamiento transversal máximo del centro de gravedad de la grúa	62
<b>Figura 32:</b> Variación de la escora en función de la distancia transversal recorrida por la grúa, para las distintas alturas metacéntricas estimadas. Grúa con cuchara.	69
<b>Figura 33:</b> Ángulo de escora máximo en función del ángulo de vuelco de la grúa, para situación con base estabilizadora y sin base estabilizadora. Grúa con cuchara.	72
<b>Figura 34:</b> Variación de la escora en función de la distancia transversal recorrida por la grúa, para las distintas alturas metacéntricas estimadas. Grúa sin cuchara.	77
<b>Figura 35:</b> Secuencia del vuelco de la grúa durante la operación de descarga	88
<b>Figura 36:</b> Daños producidos al buque tanque por colisión de la pluma de la grúa.	89

**Figura 36:** Posición final de la grúa y buque tras producirse el vuelco de la grúa

90

## Bibliografía

### Libros:

Barras C.B., Derret D.R. *Ship stability for masters and mates*. Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-097093-6

Belenky V.L., Sevastianov N.B. *Stability and safety of ships. Risk of capsizing*. The Society of Naval Architects, 2007. ISBN 0-939773-61-9

Moore, Colin S.. *The principles of naval architecture series: intact stability*. The Society of Naval Architects, 2010. ISBN 978-0-939773-74-9.

Olivella Puig, Joan. *Teoría del Buque. Flotabilidad y estabilidad*. Edicions UPC, 1994. ISBN 84-7653-452-3

Victoria Meizoso, Jesús. *Principios de ingeniería naval*. Tórculo, 1997. ISBN 84-8964-139-0

### Páginas web

Alatas, Crane services worldwide. *Harbour mobile cranes*. A: Alatas, Crane services worldwide. Worcs (Reino Unido) 2014. [consulta junio 2014]. Disponible en <[www.alatas.com](http://www.alatas.com)>

Bluestarline. MV LAPAD. A: Blue Star on the web. 2014 [consulta Julio 2014]. Disponible en <[www.bluestarline.org](http://www.bluestarline.org)>

Teichmann Krane. *Mobile Harbour Cranes*. A: Teichmann Krane. Essen (Alemania) 2014. [consulta junio 2014]. Disponible en <<http://www.teichmann-krane.de>>

### Otras Fuentes consultadas

Consignaciones Asturianas S.A. Consignatarios. Agentes de Aduanas. *Planos del buque y características del Buque. Características de la grúa*. Gijón, 2003.



