



Estudio de estabilidad para los buques de carga rodada

Palabras clave: Ingeniería Naval, estabilidad de buques, buques de carga rodada.

Resumen:

El objetivo de este artículo es el de evaluar el buque en relación con la estabilidad en averías, tema esencial para la seguridad, teniendo también en cuenta las diversas circunstancias que pueden influir en la fase de proyecto para su evaluación. De la misma manera que se ha podido establecer comparativamente, un cierto procedimiento que permite valorar la seguridad de cumplimiento de los requerimientos de colisión de un buque con otro y que permite con aproximación hablar del nivel de seguridad de un buque, se podría establecer una valoración para la estabilidad en averías, incluso asignando un cierto factor de ponderación que permita valorar y comparar el nivel de seguridad del que se está haciendo uso. Demostrándose al final que no es necesario calcular infinidad de situaciones de carga y comprobar si éstas cumplen, como se hace en los buques militares, sino que es suficiente con calcular la curva de "KG's" máximos, y con ella, descubrir cuál es el límite al que se puede cargar el barco.

Key words: Naval Engineering, ship stability y Roll on-Roll off.

Abstract:

The goal of this research is to assess the ship regarding its stability and buoyancy to flooding conditions, which is an essential security aspect and that this study has taken into consideration through the multiple aspects that could influence its development phase. At the same time that it has been possible to establish a comparative procedure to assess the satisfaction of collision requirements allowing to characterize the safety level of a ship; it has been possible to establish an assessment of the failure stability, even assigning a value that would allow to assess and to compare such safety level. It will be demonstrated that it is not needed to compute multiple load situations and assess whether criteria is met or not, as it is the approach in military ships, but it will be sufficient to compute the curve of max "KG's" and then determine which is the load limit for that boat.



Rodrigo Pérez Fernández

Doctor Ingeniero Naval por la Universidad Politécnica de Madrid. Estuvo realizando una asistencia técnica de más de dos años en los proyectos de los portaaviones y submarinos de la armada británica en BAE SYSTEMS-Submarine Solutions, donde ostentó el cargo de SENER Support Manager desde marzo de 2008 hasta abril de 2010, con residencia en Inglaterra. Actualmente continúa su labor de soporte técnico del Sistema FORAN en las oficinas de SENER en Madrid.

Metodología para obtener el objetivo

Una situación de inundación está compuesta por un estado inicial definido por una situación de carga o por los calados a popa, proa y la altura del centro de gravedad, o por una familia de calados y una situación de avería, a partir de los identificadores de los compartimentos inundados. Para el cálculo de la estabilidad se puede considerar libre la comunicación en los compartimentos inundados, o bien que no entre más agua de mar, una vez alcanzada la flotación de equilibrio. Los cálculos se pueden realizar por dos métodos diferentes: *pérdida de empuje* o *peso añadido*. En este trabajo haremos el estudio utilizando el método de pérdida de empuje, equivalente al que la Organización Marítima Internacional (OMI) llama *volumen constante*. El método de pérdida de empuje establece que el desplazamiento permanecerá constante durante todos los cálculos excepto cuando existan compartimentos inundados con carga líquida lo cual puede ocurrir cuando la situación inicial venga dada por una situación de carga. En este caso, el primer paso consiste en la pérdida

de pesos correspondiente a las cargas líquidas. A continuación, se calculan los volúmenes de los compartimentos inundados hasta la flotación inicial, con las correspondientes modificaciones del empuje, centro de carena, características de la flotación, etc. Esta nueva situación no será de equilibrio, pero se estimarán los nuevos calados, trimado y escora necesarios para obtener el equilibrio.

Lo primero que se debe hacer para afrontar este trabajo es la elección del buque que servirá para realizar el estudio. Para la elección se deben tener en cuenta diferentes factores como son el tipo de buque y su compartimentación. El compartimentado no sólo consiste en disponer una serie de mamparos longitudinales o transversales a unas distancias más o menos óptimas sino que, dentro de él, lleva implícitas algunas filosofías y detalles en los que hay que poner especial cuidado. Como idea fundamental del buque en medición de emergencia, éste debe ser abandonado y evacuado, con garantía de que la crítica situación se haga desde el punto de vista de la seguridad.

- El buque se debe mantener a flote el tiempo suficiente.

- La evacuación de las personas debe realizarse sin que grandes escoras puedan hacerla inviable.
- Los medios de salvamento deben estar disponibles y poder ser utilizados en su totalidad, sin que las condiciones de equilibrios del buque los hagan inútiles.

Esta serie de principios hace que la condición que se deba buscar, después de la avería, sea sin escora, es decir, una condición simétrica. El estudio de avería se hace por el costado, esto es, suponiendo que una avería por fondo está suficientemente protegida por la exigencia de un doble fondo a lo largo del buque. Estos dos principios llevan a buscar una disposición simétrica de los espacios de inundación, y una comunicación rápida entre los costados del buque, a fin de que la avería originada en un costado del mismo se vea compensada por el paso del agua al costado contrario. Esta solución hace que sea muy común la utilización de tanques laterales que se comunican rápidamente a través del doble fondo. Sin embargo, esta solución ha quedado cuestionada tras el accidente del buque Parsiphae, donde se rasgaron más de 60 m de doble fondo, situación que el buque no soportó por no llevar esta solución mencionada. Las puertas estancas entre compartimentos han de disponerse de forma que no se vean afectadas por la penetración de avería, considerada, normalmente "B/5"; también se estudiará para "B/10", aunque este caso será un supuesto. Además, no se podrá colocar más de una puerta estanca en un mamparo transversal.

Por ello, la elección ha sido un buque RO-RO, con dos líneas de ejes, cuya bodega posee un doble fondo a una altura superior al décimo de la manga al calado de escantillonado. Y que, aunque no existen requerimientos sobre la situación de los mamparos longitudinales, éstos se sitúan a una distancia del quinto de la manga respecto al costado, al ser ésta la penetración transversal de la avería que se considera en los reglamentos.

Como se indicó anteriormente, debido al accidente del Parsiphae, en este buque RO-RO se ha optado por la utilización de tanques laterales que se

Glosario

Buque en rosca: el que está acabado de construir, sin aparejo ni máquinas y con solo el casco.

Calado: distancia entre la cara inferior de la quilla de un buque hasta el plano de flotación.

Calado de escantillonado: es el calado para el cual está diseñada la estructura.

Calado del buque en rosca: es el calado del buque cuando se acaba de construir: sin combustible, pertrechos, víveres ni tripulantes.

Carena: se denomina así al volumen limitado por el casco y por la superficie de flotación en un buque. También puede denominarse carena al volumen sumergido.

Centro de carena: el centro de gravedad del volumen de agua desplazado por un flotador, para una condición dada. También se conoce con el nombre de centro de empuje, ya que es con fines de estabilidad donde se considera aplicada dicha fuerza.

Criterios de estabilidad: es el conjunto de normas que debe cumplir un buque para que su estabilidad alcance valores mínimos que garanticen su seguridad.

Desplazamiento: peso total del buque expresado en toneladas métricas. Coincide con el peso del agua desalojada por su parte sumergida u obra viva.

Efecto adrizante: el término adrizado es utilizado en ingeniería naval para referirse a la posición paralela de la cubierta de la embarcación respecto al nivel del mar. El efecto adrizante será aquel que saque de la posición escorada al buque.

Escora: es la inclinación que toma un buque cuando éste se aparta de la vertical al sufrir un corrimiento de la carga u otros motivos.

Francobordo: distancia vertical entre la línea de flotación y la línea de cubierta. En caso de existir una abertura capaz de embarcar agua más baja que la cubierta, se tomará esta abertura como límite superior del francobordo.

KG: es la posición vertical del centro de gravedad del buque.

Manga: es la medida del barco en el sentido transversal, es decir de una banda a otra (de estribor a babor). Se mide en la parte más ancha del barco. Cuando aparece una distancia en el artículo (B/5), significa que es igual a la quinta parte de la manga.

Trimado: también llamado asiento. Es la diferencia de los calados a popa y proa.

comunican rápidamente a través de túneles situados en el techo del doble fondo, y que son estancos a la entrada de agua si hubiese una vía en el fondo.

El diseño de este buque se ha realizado con dos alternativas de compartimentado, uno a "B/5" y otro a "B/10" supuesto, con lo que se pueden comprobar las diferencias que se tienen si se compartimenta de una manera o de otra.

Hay que tener claro que la estabilidad intacta es una cuestión de geometría y formas, independiente de pesos, como también es función de las formas los "KG's" límites; por lo tanto, para los cálculos de estabilidad, tanto en intacta como en averías, son independientes las condiciones de carga.

Para calcular los "KG's" máximos se necesitan definir los calados, los cuales se encontrarán entre el mínimo, que es el calado con el buque en rosca, y el máximo, que será el calado de escantillonado. El buque elegido es un RO-RO al cual se ha compartimentado de dos maneras distintas, una a "B/5" y otra a "B/10". Por lo tanto, se tienen dos buques a estudiar; que de ahora en adelante se llamarán: "i001" al compartimentado a "B/5"; e "i002" al compartimentado a "B/10". En los buques de prueba ("i001" e "i002"), se tiene:

- Calado mínimo = Calado del buque en rosca = 4.510 (m).
- Calado máximo = Calado de escantillonado = 7.100 (m).

También se debe definir el número de incrementos entre el calado mínimo y el máximo, que será de 2.

Por último, además de definir el rango de calados se debe definir el trimado inicial. Para el estudio se definirá trimado nulo.

A continuación se realizan los cálculos en intacta para comprobar si los buques prueba cumplen con la estabilidad en intacta, ya que si no cumplieren, los valores que se obtuvieran al finalizarse el trabajo no tendrían valor alguno. Los resultados en intacta son iguales tanto en el buque "i001", como en el "i002", ya que estos buques solo se diferencian en la posición del mamparo longitudinal "MAMPARO 1", situado a "B/5" en el buque "i001", y a "B/10" en el "i002".

Tabla 1. Criterios a evaluar

Criterio de estabilidad "OMI" seleccionado
Criterio de "OMI" de viento
Área quilla de balance = 45.00 (m ²)
Velocidad del viento = 51.40 (nudos)

Tabla 2. Subcriterios

CRITERIO NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	"GZ" de 0.2 (m) entre 30.0 (grados) y 90.0 (grados)
2	"DN" de 55.0 (mm*rd) entre 0.0 (grados) y 30.0 (grados)
3	"DN" de 90.0 (mm*rd) entre 0.0 (grados) y 40.0 (grados) (ángulo de inundación progresiva)
4	"DN" de 30.0 (mm*rd) entre 30.0 (grados) y 40.0 (grados) (ángulo de inundación progresiva)
5	"GM" > 0.150 (m)
6	Ángulo para el cual se tiene el "GZ" máximo > 25.00 (grados)
7	Criterio de "OMI" - viento

Tabla 3. "KG's" (m) máximos permisibles para cada subcriterio

	TM (m)	4.51	5.37	6.24	7.10
	DP (T)	12245.9	14442.9	19142.6	22521.9
	OFA (GR)	50.6	47.9	44.6	42.2
Crit. N°	"KG's" (m) MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CADA SUBCRITERIO				
1		14.44	14.13	13.82	13.60
2		15.21	14.53	13.93	13.59
3		14.67	14.21	13.81	13.58
4		14.01	13.84	13.70	13.61
5		15.93	14.93	14.12	13.87
6		12.75	13.60	14.03	14.00
7		12.38	12.92	13.20	13.22

Tabla 4. Valores límite de todos los criterios elegidos

TM (m)	DP (T)	Criterio	KG (m)	GM (m)
4.51	12245.9	7	12.38	3.700
5.37	15197.3	7	12.92	2.160
6.24	19142.6	7	13.20	1.070
7.10	22521.9	7	13.22	0.800

Siendo:
 "TM" el calado medio en metros,
 "DP" el desplazamiento en toneladas,
 "OFA" el ángulo de inundación de aberturas en grados, "KG" la altura del centro de gravedad permisible

medida en metros y "GM" la altura metacéntrica mínima permisible también en metros.

Es importante advertir que el ángulo de inundación progresiva es mayor que 40°.

Razonamiento de cómo se va a conseguir lo propuesto en el objetivo

Para ello se empieza por definir las dimensiones de avería a considerar; es decir, una eslora de averías, una penetración y una altura.

Estas dimensiones, basadas en estadísticas de avería, son definidas como:

- Longitud de averías = $3\% L + 3$ (m).
- Penetración de avería = "B/5" ó "B/10" (supuesto).
- Altura de avería = De arriba abajo sin límite.

La filosofía que se ha empleado para definir cada avería ha sido la siguiente:

- Las averías que van desde la "AV01" hasta la "AV09" son averías de un solo compartimento, que producirá una pérdida de empuje.
- Las averías que van desde la "AV10" hasta la "AV17" son averías de dos compartimentos contiguos, que producirá, lógicamente, una pérdida de empuje.
- Las averías "AV18" y "AV19" son averías de la Cámara de Máquinas.
- Y la avería "AV20" es la avería completa de todos los tanques comprendidos entre la cuaderna "#93" y la cuaderna "#114".

A continuación se explica el proceso seguido para "averiar" el buque:

- La avería de un compartimento avanza de popa a proa, desde la avería "AV01" hasta la avería "AV07".
- Las averías "AV08" y "AV09" son de Cámara de Máquinas.

- La avería de dos compartimentos avanza de popa a proa, desde la avería "AV10" hasta la avería "AV15". El resto de averías son de Cámara de Máquinas.

- Parece que hay algunos compartimentos cuya avería se repite, pero se trata de buscar el abanico más amplio de posibilidades de inundación.

- Mencionar por último que estas averías están hechas para varios calados iniciales.

En función de los calados y de las condiciones de inundación vistas anteriormente, se va obteniendo la estabilidad en averías, ya que hay que recordar que para la estabilidad en averías no es necesario conocer las condiciones de carga, puesto que la estabilidad depende de la carena, que es lo que se pierde cuando se inunda un barco. Se ha averiado el buque, compartimento por compartimento.

La avería puede considerarse como inundación por una abertura en el costado, en el fondo o una avería en la cubierta que permita la entrada de agua y dé lugar a una inundación del buque, pero en este trabajo la avería se produce en un costado, de abajo a arriba. Cuando se inunda un compartimento se produce una pérdida de flotabilidad, una variación de asiento, una variación de altura metacéntrica transversal y una variación de altura metacéntrica longitudinal.

Ahora se pretende hacer un estudio de los "KG's" máximos, estudiar la esta-

bilidad en averías. Para ello se necesita de la ayuda de un software adecuado para la realización de los cálculos. Se elige una condición de avería y una situación inicial del buque intacto, y se van obteniendo los resultados que se explicitan en el anexo.

Explicitación de la obtención del objetivo

Es importante saber que los cálculos teóricos se realizan teniendo en cuenta que, al afectar la avería al costado del buque, se prescinde en el cálculo del efecto de la superestructura que rodea al garaje de la cubierta principal, y el único empuje del barco es el que se obtiene del volumen de buque que queda por debajo de esta cubierta.

La razón por la cual se prescinde de este efecto de la superestructura, es debido a que en todo momento la avería produce la igualación de los niveles de agua exterior e interior. También es importante saber que no se correlaciona el modelo teórico con los resultados de los ensayos. En los ensayos, una vez introducida el agua en la cubierta, el barco se escora a uno y otro lado del equilibrio, debido al balance del buque. La avería se produce en un costado y, por tanto, cuando se inclina hacia el costado no averiado se produce un evidente empuje del costado intacto, que a su vez es la causa de adrizamiento.



Cuando se escora hacia el lado averiado los niveles de agua exteriores no son nunca iguales, por lo que también puede existir un efecto de empuje, cuando el nivel exterior es mayor que el interior. Estos efectos de empuje, relacionados con el balance del buque, no se tienen en cuenta en los cálculos y si tienen su efecto en el ensayo.

La solución que se podría adoptar es dar a la superestructura un cierto valor de permeabilidad, para tener en cuenta este efecto adrizante (sólo para el caso del cálculo con agua en cubierta). Éste valor se podría deducir a partir de los ensayos realizados hasta el momento, y de los ensayos que se vayan realizando en un futuro próximo.

Curiosamente esta consideración de flotabilidad, como concepto de superestructura abierta, era abordada en el Reglamento de Francobordo, del año 1930, aunque posteriormente se suprimió en el Reglamento de Líneas de Carga, de 1966.

Así mismo, en los ensayos de supervivencia de ferries, realizados por el Reino Unido, como consecuencia del hundimiento del *Herald Free Enterprise*, se afirma en las conclusiones el evidente efecto de la superestructura del garaje como par adrizante, aunque también se afirma la dificultad de su evaluación.

Cálculos en averías

Seguidamente se explica qué se va a realizar y con qué propósito:

- Se obtiene la envolvente de los mínimos "KG's" máximos de las diferentes averías.
- Se calcula el desplazamiento del buque como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

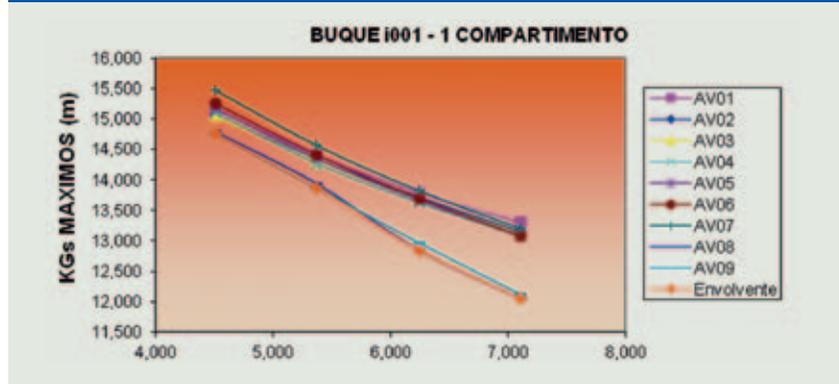
$$\Delta_{\text{Agua en dos tanques con superficie libre (a igualdad de trimado)}} + \Delta_{\text{PROBLEMA}} = \Delta_{\text{FICTICIO}} + \quad (1)$$

- Se calcula el "KG's" máximo del buque como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

$$KG_{\text{MÁX CURVA CONDICIONANTE}} = KG_{\text{FICTICIO}} + \sum \frac{i}{V} \quad (2)$$

- Se comprueba cual de los diferentes criterios de estabilidad falla primero con la situación de carga definida con

Figura 1. Curva de "KG's" máximos, en averías, para un compartimento del buque "i001"



los nuevos "KG's" y se observa si existe homogeneidad en ello.

Para 1 compartimento

Buque "i001":

Se calcula la envolvente de los mínimos "KG's" máximos, que son aquellos que dan el límite a partir del cual, bajo cualquier avería definida de un solo compartimento, el buque "i001" soportará la situación de carga que se defina (ver figura 1).

Se va a calcular el desplazamiento del barco como un sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. También se procede al cálculo del "KG" máximo del barco como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Por tanto, para poder hacer estos cálculos, se requiere la selección de los tanques con superficies libres. Y para que los cálculos tengan mayor verosimilitud, se harán diferentes configuraciones, es decir, se elegirán diferentes compartimentos, para poder así contrastar más

las conclusiones. Se estudiará, no solo el comportamiento con dos tanques con superficies libres, sino con tres y cambiando la configuración de éstos. En los anexos se expone cada grupo de tanques con superficies libres.

Se calcula el desplazamiento del buque, para los calados en estudio (que son a "4.15", "5.37", "6.24" y "7.10" metros, respectivamente), como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Estos resultados están expuestos en los anexos. En los anexos también se calcula el "KG" máximo del buque, para los calados en estudio, como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

Buque "i002":

Igual que para el caso del buque "i001", se calcula la envolvente de los mínimos "KG's" máximos, que son aquellos que marcan el límite al cual bajo cualquier avería definida de un solo compartimento, el buque "i002", soportará la situación de carga que se defina (ver figura 2).

Figura 2. Curva de "KG's" máximos, en averías, para un compartimento del buque "i002"

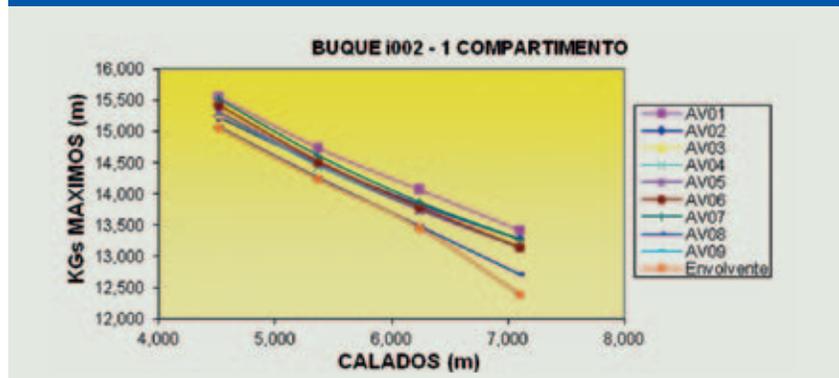
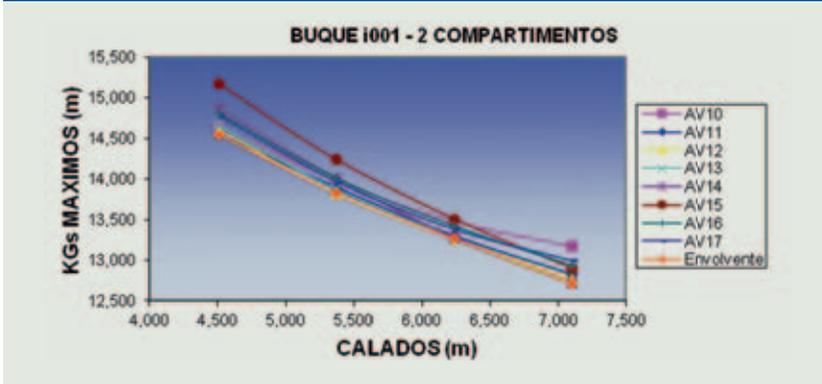


Figura 3. Curva de "KG's" máximos, en averías, para dos compartimentos del buque "i001"



Se deberá calcular el desplazamiento del barco como la suma de los desplazamientos de los tanques con superficies libres que se definan y otro ficticio. También se hallará el "KG" máximo del buque como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Más tarde, para poder desarrollar estos cálculos, se requiere la selección de los tanques con superficies libres. Y para que los cálculos tengan mayor verosimilitud, se harán diferentes configuraciones, es decir, se elegirán diferentes compartimentos, para poder así argumentar más las conclusiones. Se estudiará no solo el comportamiento con dos tanques con superficies libres, sino con tres y cambiando la configuración de éstos. En los anexos se expone cada grupo de tanques con superficies libres. Se calcula el desplazamiento del buque, para los calados en estudio (que son a "4.15", "5.37", "6.24" y "7.10" metros respectivamente), como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Estos resultados están expuestos en los anexos. En los anexos también se calcula el "KG" máximo del buque, para los calados en estudio, como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

Para 2 compartimentos

Buque "i001":

Como se hizo para los buques "i001" e "i002", se calcula la envolvente de los mínimos "KG's" máximos, que son aquellos que indican el límite al cual, bajo cualquier avería definida de un solo compartimento, el buque "i001", aguantará la situación de carga que se defina (ver figura 3).

Se debe de calcular el desplazamiento del buque como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. También se calcula el "KG" máximo del buque como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Por tanto, para poder realizar estos cálculos se requiere la selección de los tanques con superficies libres. Y para que los cálculos tengan mayor verosimilitud, se harán diferentes configuraciones, es decir, se elegirán diferentes compartimentos, para poder así argumentar más las conclusiones. Se estudiará, no solo el comportamiento con dos tanques con superficies libres, sino con tres y cambiando la configuración de éstos. En los anexos se expone cada grupo de tanques con superficies libres. Se hallará el desplazamiento del barco para los calados en estudio (que son a "4.15", "5.37", "6.24" y "7.10" metros, respectivamente), como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Estos resultados están expuestos en los anexos.

En los anexos también se calcula el "KG" máximo del buque, para los calados en estudio, como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

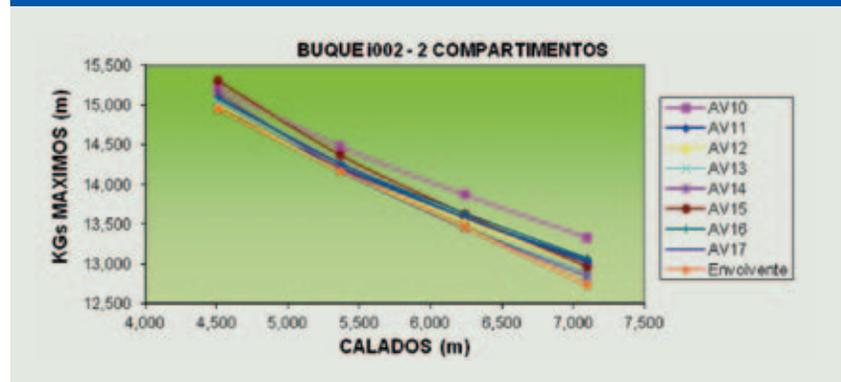
Buque "i002":

Por último se debe poder calcular la envolvente de los mínimos "KG's" máximos, que son aquellos que dan el límite al cual bajo cualquier avería definida de un solo compartimento, el buque "i002" soportará la situación de carga que se defina (ver figura 4).

Se va a hallar el desplazamiento del buque como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. También se calcula el "KG" máximo del buque como sumatorio de los "KG's" máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Entonces, para poder realizar estos cálculos se requiere la selección de los tanques con superficies libres. Y para que los cálculos tengan mayor verosimilitud, se harán diferentes configuraciones, es decir, se elegirán diferentes compartimentos, para poder así argumentar más las conclusiones. Se estudiará, no solo el comportamiento con dos tanques con superficies libres, sino con tres y cambiando la configuración de éstos. En los anexos se expone cada grupo de tanques con superficies libres.

Se calcula el desplazamiento del buque, para los calados en estudio (que son a "4.15", "5.37", "6.24" y "7.10" metros respectivamente), como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Estos resultados están expuestos en los anexos. En los anexos también se calcula el

Figura 4. Curva de "KG's" máximos, en averías, para dos compartimentos del buque "i002"



“KG” máximo del buque, para los calados en estudio, como sumatorio de los “KG’s” máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

Comparativa y explicación de los resultados en averías

Ésta es la parte esencial. Se quiere comprobar si el buque cumple los criterios de estabilidad con una situación de carga nueva en la que se tienen dos y tres tanques, con un coeficiente de llenado de agua del 25%, y un peso ficticio definidos anteriormente, además de comparar sus resultados con los valores originales.

Lo que se pretende hacer es demostrar que el buque cumple los criterios de estabilidad con una situación de carga nueva, en la que se tienen diferentes tanques con superficies libres y un peso ficticio. Es decir, se calcula el desplazamiento del buque como sumatorio de los desplazamientos de tanques con superficies libres y otro ficticio. Se calcula el “KG” máximo del buque como sumatorio de los “KG’s” máximos de tanques con superficies libres y otro ficticio.

En los anexos aparecen los datos completos del estudio de las diferentes situaciones en las que se encuentra el buque, con más o menos tanques con superficies libres.

Los datos de las tablas 5, 6, 7, 8 y 9 son extraídos de los anexos. Pero como en este artículo técnico su extensión está limitada, solo se muestra un ejemplo. Las cuatro columnas se refieren, por este orden, al criterio de estabilidad, valor actual, original y límite.

Por todo ello, para cada situación de carga definida en el anterior apartado, se ha analizado, no solo si el buque cumple los criterios de estabilidad, sino cual es el primer criterio que fallaría y si siempre ha sido el mismo. Se podría afirmar por tanto que existe homogeneidad. Se comprueba cual de los diferentes criterios de estabilidad falla primero y se observa que siempre falla primero el mismo, la *estabilidad dinámica* entre 30.0° - 40.0°, luego hay homogeneidad y el criterio de la “OMI” es suficiente. Además se puede afirmar que ese “KG” máximo ficticio corrige los cálculos.

Para demostrar esta afirmación se definió una nueva situación de carga

Tabla 5. Tanques con superficies libres en los compartimentos “VI3C” y “VI2C”

Para I compartimento. Buque “i001”			
ESTABILIDAD DINÁMICA entre 30.0 (gr) - 40.0 (gr)	112.9000 (mm*rad)	165.8000 (mm*rad)	30.0000 (mm*rad)

Tabla 6. Tanques con superficies libres en los compartimentos “VI3C”, “MQ07” y “VI2C”

Para I compartimento. Buque “i001”			
ESTABILIDAD DINÁMICA entre 30.0 (gr) - 40.0 (gr)	108.3000 (mm*rad)	165.8000 (mm*rad)	30.0000 (mm*rad)

Tabla 7. Tanques con superficies libres en los compartimentos “VI3C”, “MQ01” y “VI2C”

Para I compartimento. Buque “i001”			
ESTABILIDAD DINÁMICA entre 30.0 (gr) - 40.0 (gr)	106.1000 (mm*rad)	165.8000 (mm*rad)	30.0000 (mm*rad)

Tabla 8. Tanques con superficies libres en los compartimentos “VI3C”, “MQ01” y “MQ07”

Para I compartimento. Buque “i001”			
ESTABILIDAD DINÁMICA entre 30.0 (gr) - 40.0 (gr)	109.5000 (mm*rad)	165.8000 (mm*rad)	30.0000 (mm*rad)

Tabla 9. Tanques con superficies libres en los compartimentos “MQ07” y “V09C”

Para I compartimento. Buque “i002”			
ESTABILIDAD DINÁMICA entre 30.0 (gr) - 40.0 (gr)	105.2000 (mm*rad)	192.6000 (mm*rad)	30.0000 (mm*rad)

compuesta por el buque de la situación inicial, más el buque con los tanques con superficies libres. Y se pudo observar que ninguno de los dos sumandos corrige los cálculos. También se podría probar esta sentencia viendo como el Sistema FORAN analiza estos datos y como el “KG” máximo ficticio corrige los valores.

Conclusiones

En el primer apartado del trabajo se había planteado un objetivo, que no era otro que el de demostrar que no es necesario calcular infinidad de situaciones de carga y ver si éstas cumplen, como se hace en los buques militares, sino

que es suficiente con calcular la curva de “KG’s” máximos y con ella saber cuál es el límite al que se puede cargar el barco, que es lo que se hace con los mercantes.

A medida que se ha ido realizando el trabajo, se ha llegado al convencimiento de que las marinas de guerra deberían realizar los mismos cálculos que estipula la OMI para los mercantes, y no entretenerse en realizar la laboriosa tarea de estudiar cada situación de carga que se estipule; simplemente, calcular la curva de “KG’s” máximos que nos dará el límite al cual se puede cargar un barco, y bajo el cual no se tendrán problemas.

Para llegar a esta conclusión se ha necesitado comprobarla en un buque, para lo cual ha sido elegido un RO-RO. Se ha compartimentado y calculado su estabilidad tanto en intacta como en averías. Se han definido las averías de un solo compartimento y de dos contiguos, de abajo a arriba (ya que la normativa dice que cualquier buque debe soportar la avería de dos compartimentos contiguos), estando la avería definida de abajo a arriba.

Una vez realizado esto, se calculan las curvas de "KG's" máximos para cada avería, a cuatro calados diferentes y a un trimado cero. Se halla la envolvente de los mínimos "KG's" máximos, que será la que marque el límite. Posteriormente se busca conseguir el desplazamiento y el "KG" máximo de las envolventes como el sumatorio de unos tanques con superficies libres y un peso ficticio a hallar. Con esto se pretende demostrar que, independientemente de la avería que se produzca y de los tanques con superficies libres que se tengan, siempre falla primero el mismo criterio, es decir; existe una homogeneidad, y por tanto se demuestra que el método aplicado por la OMI es suficiente y no necesario hacer los cálculos de las diversas situaciones de carga.

Como se había apuntado al comienzo del trabajo, no es necesario calcular multitud de condiciones de carga y ver si estas cumplen, sino que, con conocer la curva de "KG's" máximos, se sabe hasta dónde se debe cargar el buque. Se ha comprobado que el primer criterio de estabilidad que falla primero es siempre el mismo, la ESTABILIDAD DINÁMICA entre 30.0° - 40.0°, y se observa que por tanto existe homogeneidad en ello,

luego el criterio de "OMI" es suficiente.

La seguridad contra el hundimiento es y ha sido uno de los temas más importantes en la concepción del buque, tanto para el proyecto, como para la explotación del mismo. Su evolución ha sido constante desde finales del siglo pasado hasta la actualidad. Los métodos ingeniosos de cálculo de principios de siglo, comparados con las herramientas informáticas actuales, han hecho que tanto el análisis como la búsqueda de soluciones a una condición de avería haya podido hacerse de una manera mucho más profunda en la actualidad. Los requerimientos de estabilidad después de averías, cuyo nivel de exigencia ha aumentado drásticamente en los últimos 20 años, motivado por los hundimientos del "Free Enterprise" y el "Estonia", y la orientación de la filosofía de compartimentado por el campo probabilístico, hacen que el concepto de proyecto de los buques de pasaje, sea de completa actualidad y que esté en continuo cambio.

Los procedimientos de cálculo por el método probabilístico para el estudio del compartimentado son complejos y de difícil aplicación durante el proyecto del buque.

Por el momento, sólo se es capaz de evaluar el cumplimiento de un buque con respecto a un requerimiento determinado. Es necesario hacer un análisis de varios conceptos que entran dentro de la seguridad del buque. Es necesario analizar también la seguridad contra el hundimiento desde el punto de vista de la seguridad total del buque, con una valoración cuantitativa de la misma. Se debe investigar si existen otros caminos para poder analizar la seguridad contra el hundimiento. ■

Bibliografía

- [1] Arias, C. (1997). Evolución de la estabilidad de los buques RO-RO de pasajeros desde la conferencia SOLAS 1995. *Revista de Ingeniería Naval*, p. 496.
- [2] Arias, C. y del Castillo, F. (2002). La estabilidad después de averías para los buques de carga seca y buques de pasaje. Nueva herramienta para la optimización del compartimentado del buque. *Revista de Ingeniería Naval*, p. 1473.
- [3] Nato Naval Armaments Group. (2007). *Naval Ship Code. Maritime Capability Group 6. Specialist team on naval ship safety and classification*. Allied naval engineering publication.
- [4] Organización Marítima Internacional. (2004). *Goal-based new ship construction standards*. IMO, working group on goal-based standards at MSC 79.
- [5] Papanikolaou, A. y Boulougouris, E. (2000). *On a rational approach to the assessment of survivability of surface naval and merchant ships*. Proc. 9th congress of the Int. Maritime Association of Mediterranean, IMAM 2000. Ischia.
- [6] Pérez Fernández, R. (2009). Estudio de la adecuación y suficiencia de los "KG's" límites para el cumplimiento de los criterios de estabilidad en los diversos campos, para los buques de carga rodada (mercantes-militares). 48° Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima. Vigo. 25 y 26 de junio.
- [7] Pérez Fernández, R. (2011). Nuevos métodos para afrontar la estabilidad en caso de averías. 50° Congreso de Ingeniería Naval e industria Marítima. Cádiz. 26, 27 y 28 de octubre.
- [8] Riola, J.M. y Pérez Fernández, R. (2009a). Criterios de estabilidad de la Armada Norteamericana, Británica y SOLAS. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa*, n.º 25.
- [9] Riola, J.M. y Pérez Fernández, R. (2009b). *Warship damage stability criteria case study*. *Journal of Maritime Research*, vol. 6, n.º. 3, pp. 75-100.
- [10] Riola, J.M. y Pérez Fernández, R. (2009c). Estudio comparativo entre los criterios de estabilidad de la Armada Norteamericana, Británica y del SOLAS. *Revista Ingeniería Naval*. Julio-Agosto, pp. 815-832.
- [11] Riola, J.M. y Pérez Fernández, R. (2009d). Estudio comparativo entre los criterios de estabilidad de la Armada Norteamericana, Británica y del SOLAS. 48° Congreso de ingeniería naval e industria marítima. Vigo. 25 y 26 de junio. Primer premio, "medalla de oro a la mejor ponencia", en dicho congreso.
- [12] Sarchin, T.H. y Goldberg, L.L. (1962). Stability and buoyancy criteria for the US naval surface ships. *Trans. SNAME*, vol. 70, pp. 418-458.
- [13] Surko, S.W. (1994). An assessment of current warship damaged stability criteria. *Naval Engineers Journal*, vol. 106, n.º.2, pp. 120-131.
- [14] US Navy, Naval Ship Engineering Center. (1975). *Design Data Sheet-stability and buoyancy of US naval surface ships, DDS 079-1*. US Navy, currently Naval Sea Systems Command. Washington DC, Estados Unidos.
- [15] Vassalos, D. (1999). Shaping ship safety: The face of the future. *Journal of Marine Technology*, vol. 36, n.º. 2, pp. 61-73.

