CAPITULO 5

Estabilidad Transversal Inicial

Equilibrio de cuerpos parcialmente sumergidos

Un flotador en equilibrio estático está sometido a la acción de dos fuerzas: el peso del propio cuerpo y el empuje correspondiente al líquido desalojado. Cuando se encuentra en reposo, las ecuaciones del movimiento se expresan como:

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F} = \vec{O} \qquad [1.]$$

$$I_0 \cdot \vec{\omega} = \sum \vec{M} = \vec{O} \qquad [2.]$$

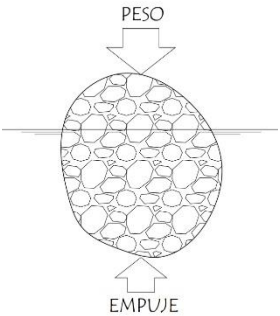


Fig. 1 - Equilibrio de fuerzas para un flotador

Las condiciones de equilibrio se pueden expresar matemáticamente a través de las siguientes relaciones:

$$\sum F = E \cdot \vec{j} - W \cdot \vec{j} = O \qquad [3.]$$

$$\sum M = (B - O) \wedge E \cdot \vec{j} - (G - O) \wedge W \cdot \vec{j} = O \qquad [4.]$$

A partir de la ecuación 3 se deduce que los vectores peso y empuje deben ser paralelos y coincidentes e iguales en módulo.

$$E = W \qquad [5.]$$

mientras que la ecuación 4 permite establecer que los vectores *(B-O)* y *(G-O)* no sólo son paralelos, sino que son colineales, y por lo tanto B y G están alineados sobre la misma referencia vertical.

Se puede concluir entonces que un cuerpo flotante en condiciones de estabilidad estática está sometido a dos fuerzas, el peso propio y el empuje hidrostático. Ambas fuerzas son iguales en módulo y opuestas en sentido de aplicación, actuando sobre una misma dirección.

Estabilidad inicial de flotadores

Si se desplaza ligeramente el cuerpo de su posición de equilibrio inicial mediante un giro infinitesimal; suponiendo que la nueva posición no es una posición de equilibrio, el cuerpo buscará volver a la posición inicial de equilibrio o buscará una nueva, lo cual supondrá un movimiento rotacional con una cierta aceleración angular.

La ecuación [3] no tendrá modificaciones en su tratamiento dado que no se ha planteado la modificación del peso. Se mantiene entonces la observación de que el peso seguirá siendo igual al empuje, y que los vectores de actuación serán paralelos.

Considerando ahora la ecuación [4], la situación se presenta diferente, al existir una aceleración angular no nula:

$$I_o \ddot{\theta} = \vec{M} = (B - O) \wedge E \cdot \vec{j} + (G - O) \wedge W \cdot \vec{j} = W.(B - G) \wedge \vec{j} \neq 0 \qquad [6.]$$

En este caso los vectores (B – G) y $\vec{J}$ no son colineales, lo que indica que los puntos B y G no estarán alineados sobre la misma vertical, apareciendo un momento generado por ambas fuerzas, ahora excéntricas.

Esto significa que, alejado de su posición de equilibrio, se presenta un estado de tensiones cuya consecuencia será el movimiento del cuerpo tratando de recuperar la posición inicial o volcarse a una nueva configuración de equilibrio.

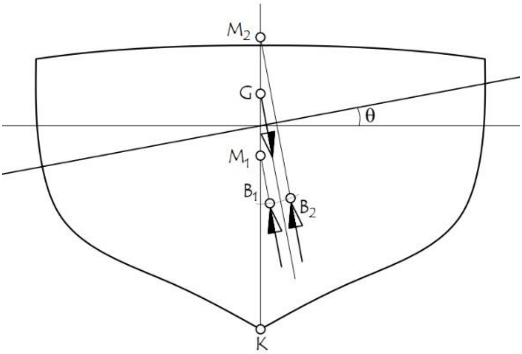


Fig. 2 - Flotador alejado de su posición de equilibrio

Veamos que sucede cuando apartamos el cuerpo de la configuración inicial de equilibrio caracterizada por el centro de gravedad G y el centroide o centro de carena B.

Como no se está afectando la distribución de pesos, el centro de gravedad permanecerá inalterado. Sin embargo, la forma del volumen sumergido encontrará un nuevo centroide, que indicamos como B_1 o B_2 en función de su posición relativa respecto a la nueva vertical por G. Es necesario analizar la situación en cada uno de los casos mostrados. La posición relativa del mencionado metacentro inicial M con relación al centro de gravedad G determinará el sentido del momento o par, y por tanto el comportamiento del cuerpo en relación con el sentido de giro posterior.

Si el nuevo centroide es B_1, el momento será:

$$\vec{M} = (B_1 - G) \wedge E \cdot \vec{J}' \qquad [7.]$$

El momento $\vec{M}$ tiene sentido horario, y por lo tanto forzará al cuerpo a alejarse aún más de la posición de equilibrio inicial. El equilibrio inicial en este caso se dice que es inestable, y se verifica entonces cuando $VCB > VCM$.

Si el nuevo centroide, en cambio, pasa a ser B_2:

$$\vec{M} = (B_2 - G) \wedge E \cdot \vec{J}' \qquad [8.]$$

En este caso el par actuará en sentido contrario, restituyendo el cuerpo a la posición inicial. El equilibrio inicial en este caso en que $VCB < VCM$, se dice que es estable.

La condición del equilibrio de un flotador dependerá, de acuerdo con lo previamente establecido, del sistema de fuerzas (peso y empuje) y, de la posición relativa entre el centro de gravedad y el metacentro inicial.

El momento o par que se establece cuando nos alejamos de la posición de equilibrio se denomina par de adrizamiento si tiende a restituir la posición de equilibrio inicial o de escoramiento si fuerza a alejarse aún más de ella.

Factores que inciden en la estabilidad de los buques

Existen entonces dos factores que podemos indicar como variables de ajuste: la distribución de pesos, que determina la posición del centro de gravedad, y la geometría del flotador, que determina la posición del centro de carena y el metacentro inicial.

Distribución de Pesos

La distribución de pesos en el buque determina la posición final del centro de gravedad del conjunto, al que denominamos G. La ubicación de este punto tendrá un papel fundamental en el comportamiento del buque en relación con las condiciones de estabilidad, por lo cual su determinación con el menor grado de incertidumbre es absolutamente necesario.

En las primeras etapas de diseño, habiendo definido la forma del casco y superestructura, ubicación de cubiertas y mamparos transversales y longitudinales, y definida también la subdivisión de los espacios interiores, se debe realizar una aproximación a su ubicación real.

Para ello deberán desglosarse todos los ítems que concurren en la distribución real; cuanto mayor el nivel de detalle en la definición de éstos, sus pesos y sus respectivos centros de gravedad, mayor será la precisión en su ubicación.

Genéricamente, se tienen dos clasificaciones de pesos que componen el buque.

Un primer conjunto lo constituyen aquellos elementos que tienen una distribución continua y formas no desarrollables, donde se hace más dificultosa la determinación del peso y la posición del centro de gravedad, constituido por el acero del casco y refuerzos estructurales longitudinales, la soldadura y la pintura.

El segundo conjunto está referido a elementos que pueden ser fácilmente identificados mediante un punto en el espacio representando su centro de gravedad, y el peso, como los motores y demás equipamiento de Sala de Máquinas, el equipamiento de cubierta, los elementos estructurales transversales y la carga.

El centro de gravedad global se determinará por integración de los distintos componentes que pueden estar distribuidos en forma uniforme o discreta:

$$W = \int \delta w \cdot dx + \sum_i w_i \qquad [9.]$$

Modelos para la distribución de pesos

Es necesario en esta etapa definir los pesos que componen el desplazamiento del buque vacío, los cuales tendrán componentes distribuidas en la eslora y otras con una ubicación específica, como fue reseñado en párrafos anteriores.

Pesos distribuidos en forma continua

Se entiende que están incluidos en esta categoría aquellos ítems que no están asociados a una ubicación específica y que por su dimensión resulta difícil establecer en forma directa tanto su peso como la posición de su centro de gravedad.

Ciertos desarrollos teóricos en etapas tempranas de diseño permiten determinar con algún grado de aproximación el peso de estos elementos, los cuales fundamentalmente están asociados con el forro del casco y sus estructuras internas, incluyendo soldadura y pintura.

En etapas posteriores un análisis más fino del desarrollo de chapa, de los elementos estructurales definidos individualmente, y estimaciones de planes de soldadura y pintura llevarán a valores más cercanos a la realidad.

Una vez que se determina el peso del casco distribuido en la eslora, es necesario establecer alguna función de distribución que modele la realidad. Algunos de éstos se detallan a continuación.

Distribución trapezoidal

El peso del acero del casco se distribuye en forma de trapecio cuyas dimensiones se indican en la Fig. 3, donde los valores de *a*, *b*, *c*, *LSPP*, *LSPR* y *LSM* vienen definidos por el método en función de la eslora *LPP* y el peso final.

La posición del centroide del área define la posición del centro de gravedad del peso modelado.

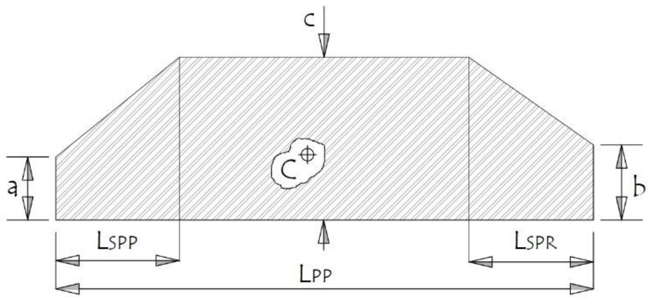


Fig. 3 - Modelo trapezoidal de distribución de acero del casco

Distribución parabólica

En este caso el peso del acero del casco se distribuye en forma de área parabólica de dimensiones mostradas en la Fig. 4, donde los valores de *a*, *b*, *c*, al igual que en el modelo anterior, vienen definidos por el método en función de la eslora *LPP* y el peso final.

Análogamente, la posición del centroide del área define la posición del centro de gravedad del peso modelado.

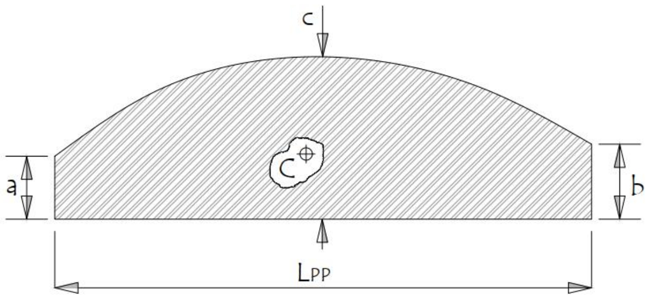


Fig. 4 - Modelo parabólico de distribución de acero del casco

Distribución según el dimensionamiento seccional

En este modelo se establece una distribución de pesos longitudinal proporcional a los perímetros de las secciones transversales (estaciones o cuadernas), haciendo que el peso por unidad de dimensión longitudinal se asocie directamente con una medida que tiene que ver con la forma verdadera del casco, Fig. 5.

Luego, la posición del centroide del área define la posición del centro de gravedad del peso modelado como en los otros casos.

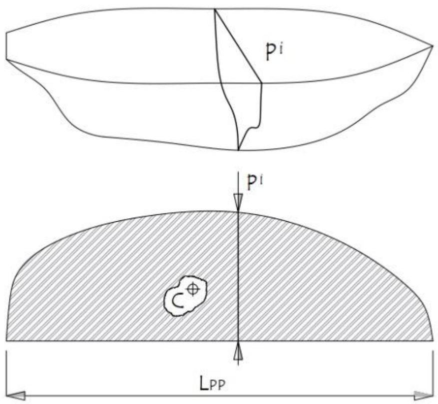


Fig. 5 - Distribución de peso según el perímetro de las estaciones

Pesos localizados

Son aquellos que están identificados con máquinas o elementos que por su configuración pueden ser ubicados en un punto o zona de la eslora, y de los cuales se conoce perfectamente la posición de su centro de gravedad.

En la mayoría de los casos éstos pueden ser representados por formas rectangulares cuya extensión coincide con la del elemento, y cuya área es proporcional al peso de este.

Por ejemplo, un motor propulsor en la sala de máquinas con un peso de W_{MOT}, con un desplazamiento longitudinal L_{MOT} en la estructura de soporte, estaría definido

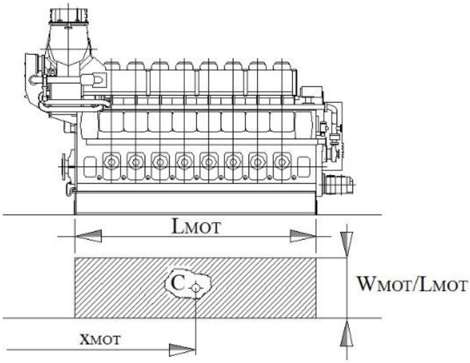
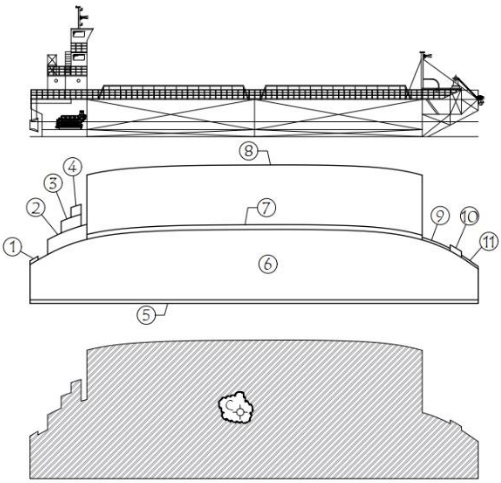


Fig. 6 - Distribución de pesos localizados: Motor Principal

entonces por un rectángulo cuya altura equivalente es W_{MOT} / L_{MOT} según lo representado en la Fig. 6.

A continuación, se presenta una distribución de pesos correspondiente a un buque de carga. Los pesos distribuidos y localizados se describen en el siguiente detalle:



1. Hélices / Toberas
2. Casillería, nivel 1
3. Casillería, nivel 2/ 3
4. Motores propulsores
5. Soldadura / pintura
6. Acero del casco
7. Tanques de doble fondo
8. Carga en Bodega
9. Pique de proa
10. Caja de cadenas
11. Lastre proa

Fig. 7 - Distribución de pesos en un buque

Momento de adrizamiento para oscilaciones pequeñas

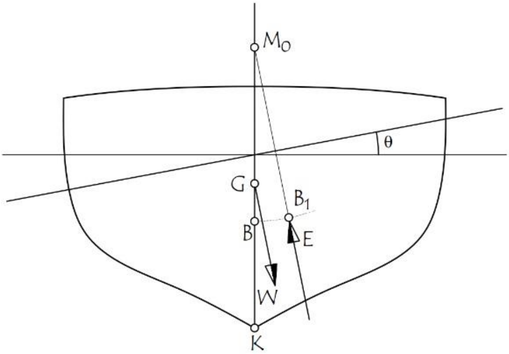


Fig. 8 - Esquema dinámico durante el balanceo de un casco

La embarcación representada en la Fig. 8 se encuentra inicialmente en equilibrio estable, siendo el punto B_0 su centro de carena. Al producirse un giro en el plano transversal, el punto B_0 evoluciona hacia el B_1.

Para pequeños ángulos de escora podremos establecer que el momento generado se puede escribir como:

$$M = \Delta \cdot GZ \qquad [10.]$$

Analizando la geometría de la sección y la distribución de fuerzas, vemos que el brazo *GZ* se puede expresar como:

$$GZ = GM_0 \cdot sen\theta \qquad [11.]$$

A partir de esta última se obtiene la expresión del momento de adrizamiento para oscilaciones en el entorno cercano de la posición de equilibrio inicial:

$$M = \Delta \cdot GM_0 \cdot sen\theta \qquad [12.]$$

Por otro lado, el análisis de la derivada de la expresión de *GZ* permite deducir algunas conclusiones sobre su comportamiento.

$$\frac{dGZ}{d\theta} = GM_0 \cdot cos\,\theta \qquad [13.]$$

En el entorno de la condición de equilibrio, el término $cos\theta$ tiende al valor unitario, por lo cual el brazo del momento restaurador tenderá hacia un valor dado por el valor de GM_0 donde M_0 es el metacentro inicial; este valor representa la pendiente de la función *GZ* para escoras en el entorno de la condición de equilibrio.

La sensibilidad en el valor de la altura metacéntrica transversal inicial es relativamente importante; la diferencia en la posición vertical de *G* por encima de la posición vertical de *B* puede llegar a límites en los cuales GM_0 se haga muy pequeño, con lo cual el momento de restauración de la condición de equilibrio transversal inicial sea muy débil.

Este análisis indica entonces que, sin necesidad de llegar a extremos límites, la estabilidad transversal inicial estará definida por valores acotados, por lo cual se deberá prestar especial atención ajustándose a los límites impuestos por los criterios de estabilidad (Criterios de Rahola).

Efecto de movimientos de pesos

Los movimientos de pesos abordo modifican la distribución inicial y determinan un nuevo posicionamiento del centro de gravedad global.

Ese desplazamiento del centro de gravedad plantea una desviación de la situación de equilibrio inicial, ante lo cual el sistema buscará el mecanismo adecuado para volver a un estado equivalente. Ese mecanismo será el giro de la carena en el plano correspondiente, hasta una posición en que nuevamente G y B vuelvan a estar alineados.

Desde el punto de vista del movimiento de giro del plano transversal o escora, nos interesa ver qué cambios introducen las traslaciones de pesos en el sentido horizontal y también vertical.

Movimiento horizontal de pesos

Se supondrá que el casco está fijado de alguna manera en su posición de equilibrio, impedido de moverse. En estas condiciones se moverá horizontalmente una distancia *d* un bulto cuyo peso es *w*.

El centro de gravedad *G*, en virtud del movimiento horizontal de *w*, se trasladará paralelamente a una nueva posición *G'*, mientras el centro de carena se mantiene en *B* en virtud de la inmovilización del casco.

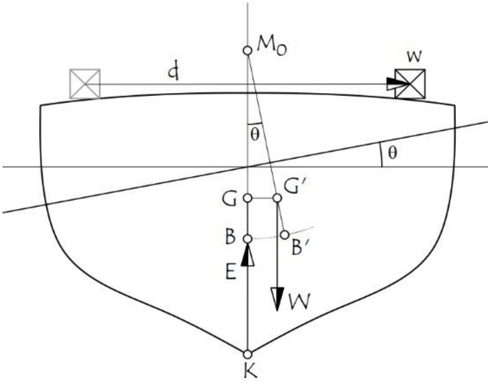


Fig. 9 - Efecto del movimiento horizontal de pesos

La excentricidad entre la fuerza de gravedad y el empuje determina la aparición de un momento M_{ESC} cuyo sentido intenta forzar el giro de la carena en el sentido horario.

Una vez liberemos el vínculo, dicho momento actuará efectivamente girando la carena hasta que una nueva posición de su centro *B'* vuelva a estar alineada con el nuevo centro de gravedad *G'* sobre la vertical a la nueva flotación, llegando a una nueva posición de equilibrio.

En esta nueva posición de equilibrio, el plano de crujía quedará formando un ángulo θ con la vertical al nuevo plano de flotación al que denominaremos ángulo de escora permanente, cuya determinación puede deducirse a partir del análisis de la Fig. 9.

En el triángulo *GMG'*, el ángulo θ puede determinarse a partir de una relación trigonométrica:

$$tg\theta = \frac{GG'}{GM_0} \qquad [14.]$$

El teorema de traslación de pesos permite determinar que el movimiento del centro de gravedad será:

$$GG' = \frac{d\ .w}{\Delta} \quad [15.]$$

de donde surge que la escora producida por ese movimiento horizontal del peso *w* se puede calcular como:

$$tg\theta = \frac{d \cdot w}{GM_0 \cdot \Delta} \quad [16.]$$

Siendo *d* la distancia horizontal que se mueve el peso *w*, GM_0 la altura metacéntrica para la condición de equilibrio inicial, y Δ el desplazamiento de la carena.

Movimiento vertical de pesos

Se moverá ahora el mismo bulto cuyo peso es *w* una distancia *h* en dirección vertical.

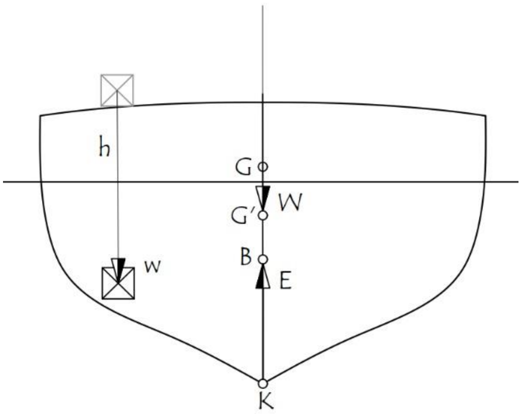


Fig. 10 – Efecto del movimiento vertical de pesos

El centro de gravedad *G* se trasladará verticalmente a una nueva posición *G'*, estando ambos sobre la misma vertical. La fuerza de gravedad se mantiene en la misma vertical de aplicación que inicialmente.

Al mantenerse las fuerzas en el mismo soporte vertical, no se producirá momento alguno y por tanto la posición inicial no se altera. El único cambio evidente es la variación de GM_0, que afecta directamente la estabilidad inicial, aumentándola o disminuyéndola en función directa con la variación de esta magnitud, en correspondencia con el descenso o la elevación del peso.

Efecto de la estiba

En términos marítimos, estibar significa cargar o descargar un buque, es decir incorporar o quitar pesos en esa operación denominada genéricamente como *estiba*.

Los pesos incorporados o quitados ocuparán una cierta posición en el buque identificada por las coordenadas de sus centros de gravedad. A los efectos de visualizar los efectos que provoca esta operación sobre la condición de equilibrio, se descompondrá la acción del posicionamiento final, ubicando inicialmente el peso sobre el plano de crujía, pero manteniendo la posición longitudinal y vertical que tomará finalmente, para luego trasladarlo horizontalmente hacia la banda la distancia que corresponda a la posición final.

Al colocar el peso en el plano de crujía, su centro de gravedad estará ubicado sobre la misma vertical del correspondiente al buque en la condición previa; el

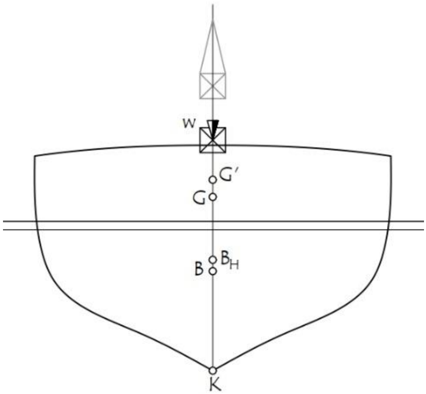


Fig. 11 - Estiba sobre crujía

desplazamiento final será la suma del inicial más el peso adicionado generando un hundimiento paralelo, mientras que el centro de gravedad final se corresponderá en su posición vertical con el valor resultante de la siguiente formulación:

$$VCG' = \frac{1}{\Delta'} \cdot (VCG \cdot \Delta + z_W \cdot w) \qquad [17.]$$

donde *w* es el peso estibado, z_w la posición vertical de su centro de gravedad y $\Delta' = \Delta + w$ es el desplazamiento final.

Finalmente se debe corregir la posición transversal llevando el peso desde crujía a la posición final, en un movimiento horizontal cuyas consecuencias podemos asociar directamente con lo visto anteriormente, generando una escora permanente que puede expresarse como:

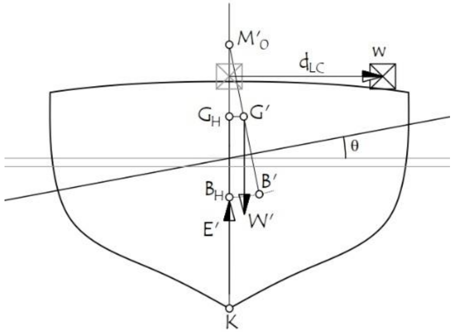


Fig. 12 – Estiba, movimiento lateral

$$tg\theta = \frac{d_{LC} \cdot w}{G'M'_0 \cdot \Delta'} \qquad [18.]$$

donde d_{LC} es la distancia del punto de estiba del peso w con relación a la línea de crujía, calculado en las nuevas condiciones hidrostáticas.

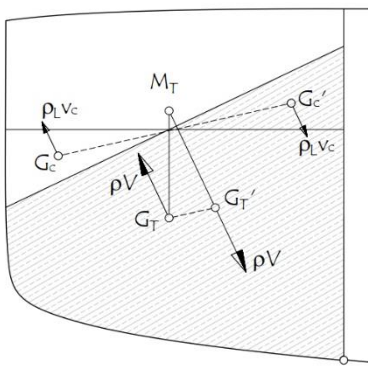


Fig. 13 - Tanque líquido

Efecto de las superficies libres en tanques

Cuando se produce una escora, las cargas líquidas existentes repiten ese movimiento, manteniendo horizontal su superficie libre. Esto implica que parte del volumen *V* líquido se desplaza en el sentido transversal, en un movimiento que puede ser analizado como una traslación de pesos.

La cuña líquida cuyo centro de gravedad es G_C se traslada hacia la posición de la cuña cuyo centro de gravedad es G'_C. Esta traslación de pesos en el plano transversal resultará en una traslación paralela y en el mismo sentido del centro de gravedad del líquido en el tanque, y en forma equivalente, del centro de gravedad del buque.

El momento neto del movimiento del líquido podemos determinarlo según la siguiente expresión:

$$M_{LIQ} = (G'_C - G_C) \wedge (\rho_L \cdot v_c) \cdot \vec{j} \qquad [19.]$$

Donde v es el volumen de la cuña líquida trasladada y ρ_L la densidad del líquido en el tanque, por lo cual su producto representa el peso de esta.

El teorema de traslación de pesos permite encontrar una expresión para el traslado del centro de gravedad del líquido en el tanque:

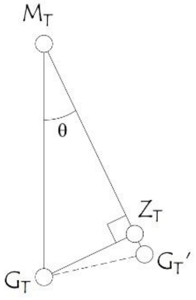


Fig. 14 - Esquema del traslado del centro de gravedad del tanque líquido

$$G'_C - G_C = \frac{(G'_T - G_T) \cdot V}{v_c} \qquad [20.]$$

Luego sustituimos la expresión de 20 en 19 y se obtiene:

$$M_{LIQ} = \frac{(G'_T - G_T) \cdot V}{v_c} \wedge (-v_c \cdot \rho_L) \cdot \vec{j} \qquad [21.]$$

Analizando la Fig. 14 encontramos que dicho producto escalar equivale a:

$$(G'_T - G_T) \wedge -\vec{j} = G_T Z \cdot \vec{\imath} = G_T M_T \cdot sen\theta \cdot \vec{\imath} \qquad [22.]$$

De donde obtenemos una primera expresión del momento generado por el traslado de la cuña líquida, que es un momento escorante cuando el buque tiene una oscilación en el mismo sentido.

$$M_{LIQ} = G_T M_T \cdot V \cdot \rho_L \cdot sen\theta \qquad [23.]$$

$G_T M_T$ es el radio metacéntrico del volumen de líquido dentro del tanque, por lo tanto, haciendo una analogía con la deducción del valor para el caso de la carena del buque, tendremos:

$$G_T M_T = \frac{I_T}{V} \qquad [24.]$$

donde I_T es el momento de inercia de la superficie libre del tanque, surgiendo una expresión simplificada para el momento escorante:

$$M_{LIQ} = I_T \cdot \rho_L \cdot sen\theta \qquad [25.]$$

Como habíamos deducido anteriormente, el buque buscará volver a su posición de equilibrio inicial a partir de la aplicación del emergente momento de adrizamiento

$$M = \Delta \cdot GM_0 \cdot sen\theta \qquad [26.]$$

Sin embargo, al haberse generado ahora un momento contrario con el movimiento del líquido, ese momento de adrizamiento se verá disminuido

$$M' = \Delta \cdot GM_0 \cdot sen\theta - I_T \cdot \rho_L \cdot sen\theta \qquad [27.]$$

Que puede ser expresado de esta otra manera:

$$M' = \Delta \cdot \left(GM_0 - \frac{I_T}{\Delta} \cdot \rho_L \right) \cdot sen\theta = \Delta \cdot \left(GM_0 - \frac{I_T}{\nabla} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_A} \right) \cdot sen\theta \qquad [28.]$$

El segundo término dentro del paréntesis es una cantidad positiva, por lo cual comparativamente $M_T < M_T'$; podemos establecer como hipótesis que existe una disminución equivalente de la magnitud GM_T, que se transforma entonces en G_VM_T, siendo GG_V la medida de este cambio:

$$GG_V = \frac{I_T}{\nabla} . \frac{\rho_L}{\rho_A} \qquad [29.]$$

Efecto de pesos suspendidos

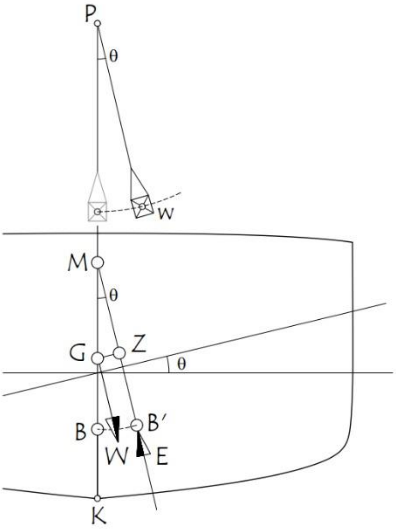


Fig. 15 – Oscilación del buque con peso suspendido

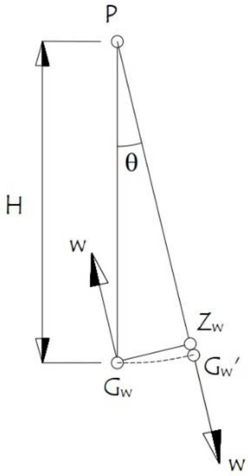


Fig. 16 - Esquema del traslado del centro de gravedad del peso suspendido

Cuando se produce una oscilación del buque en su condición de adrizamiento o equilibrio inicial, los pesos suspendidos existentes giran manteniéndose sobre una referencia vertical a la flotación, generando un momento que alterará el natural balanceo del casco, según se puede observar en la Fig. 15 y Fig. 16.

A partir del movimiento pendular, el centro de gravedad del peso suspendido se traslada de su posición inicial G_w hacia su posición final G_w' describiendo un arco de circunferencia cuyo radio corresponde a la distancia entre el punto de suspensión y el propio elemento. Este movimiento genera un momento, de igual dirección y sentido opuesto al momento de restauración

$$\vec{M}_w = (G'_W - G_W) \wedge (w) \cdot \vec{j} = (Z_W - G_W) . w \cdot \vec{k} \qquad [30.]$$

$$M_w = w.H.sen\theta \quad [31.]$$

La formulación final del momento de adrizamiento neto se deduce a partir de la suma algebraica de ambas expresiones:

$$M = \Delta.GM_0.sen\theta - w.H.sen\theta \quad [32.]$$

$$M = \Delta.(GM_0 - \frac{w.H}{\Delta}).sen\theta \quad [33.]$$

El momento de restauración natural en la condición de equilibrio se ve reducido al disminuirse la altura metacéntrica mediante la sustracción de la cantidad $\frac{w.H}{\Delta}$. Se puede interpretar como que hay un nuevo valor de GM_0 asociado a la existencia de pesos suspendidos.

Como el punto M_0 está determinado por la geometría del casco y es invariable para la condición de carga dada, se puede asumir que la disminución de esta magnitud GM_0 es debida a una elevación virtual del centro de gravedad, de la misma forma que fue explicado para las superficies libres de líquidos en tanques, en una medida dada por la siguiente expresión:

$$GG_V = \frac{w.H}{\Delta} \quad [34.]$$

Experimento de inclinación

El experimento de inclinación es un procedimiento a través del cual se obtienen datos que permiten determinar la altura metacéntrica y el correspondiente valor de la posición vertical del centro de gravedad del buque en la condición de la prueba, y a partir de allí deducir la posición vertical del centro de gravedad del buque vacío.

Desde el punto de vista operativo, consiste en el movimiento transversal y en condiciones controladas, de un conjunto de pesos de magnitud conocida, w_h, y la medición correspondiente del ángulo de escora producido.

La fundamentación conceptual del experimento de inclinación es la relación que existe entre un movimiento de pesos que genera una escora, el valor angular de ésta y la altura metacéntrica inicial, todo lo cual está vinculado por la expresión deducida para el movimiento transversal de pesos:

$$tg\ \theta = \frac{GG'}{GM_0} = \frac{d\ .\ w_h}{\Delta \cdot\ GM_0} \quad [35.]$$

a partir de la cual se obtiene:

$$GM_0 = \frac{d\ .\ w}{\Delta\ \cdot tg\ \theta} \quad [36.]$$

Teniendo en cuenta que $GM_0 = VCMT – VCG$, resultará:

$$VCG = VCMT - \frac{d \cdot w}{\Delta\ \cdot tg\ \theta} \quad [37.]$$

El valor de *VCG* medido corresponde al centro de gravedad incluyendo el efecto de las inercias de las superficies libres de los tanques; por esta razón se deberá deducir dicha cantidad para obtener la altura real:

$$VCG = VCMT - \frac{d \cdot w}{\Delta \cdot tg\ \theta} - \sum \left(\frac{i}{\nabla} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_A} \right) \qquad [38.]$$

Condiciones para la realización del experimento de inclinación

Existen una serie de condicionantes relacionadas con la realización del experimento de inclinación, que tienen que ver con detalles prácticos para tener en cuenta que incluyen el estado del tiempo, manejo de personal, utilización obligatoria de péndulos como instrumentos de medida de los ángulos de inclinación, etc. Estos requerimientos específicos han sido definidos como norma por la OMI, en su resolución MSC. 267(85); el resumen que se presenta a continuación recoge los aspectos prácticos que deben ser considerados para la ejecución del experimento basados en dicho planteamiento.

El buque deberá encontrarse adrizado, debiendo ser el valor de su asiento el mínimo posible, reflejando una configuración que pueda asimilarse a la de una carena derecha.

El desplazamiento y demás atributos deben ser determinados a partir de las Curvas Hidrostáticas, para lo cual se deberá determinar con exactitud la posición relativa del plano de flotación a partir de la medida de los calados de navegación impresos en los costados del buque en las referencias correspondientes o marcas de calados. Para el determinación de dichos calados, generalmente se hace uso de una embarcación auxiliar, a bordo de la cual se rodea el casco en todo su contorno y se realizan los registros de las marcas de calado en cada una de las secciones correspondientes.

Debe procurarse que el buque esté libre de todo peso o equipamiento adicional que no pueda ser clasificado como parte estructural en la condición de Buque Vacío. En caso que esto no pueda ser alcanzado en forma completa, se confeccionará un inventario indicando peso y ubicación de los elementos que luego deben ser descontados hasta obtener la condición buscada.

Los pesos que puedan moverse libremente deben ser trincados de manera de que se mantengan inmovilizados mientras dure el operativo.

En la medida de lo posible, se deberá minimizar la cantidad de equipos en funcionamiento, a los efectos de llevar a valores mínimos las vibraciones transmitidas a través del casco.

Los cabos de amarre serán reducidos al mínimo necesario a los efectos de evitar que el buque se aleje sin control del muelle o estructura de amarre, pero deben mantenerse sin tensión durante la realización del experimento. Toda otra conexión con tierra, como escalas, mangueras o cables de suministros deberá ser retirada. Adicionalmente se dispondrá de dos tripulantes ubicados cada uno en la zona de Proa y Popa respectivamente, a los efectos de las maniobras con las amarras y las comunicaciones de aviso cuando los cabos generan condiciones de tensión que puedan distorsionar los resultados.

El resto de la tripulación deberá ser la mínima indispensable. Suelen estar presentes el Capitán, un Piloto y el Jefe de Máquinas como autoridades representativas del Armador y a los efectos del gobierno del buque. Cuando la Clase lo requiera, participa también el Inspector de la Sociedad de Clasificación o Autoridad Marítima correspondiente a la bandera.

En caso de contar con una grúa abordo a los efectos del movimiento de los pesos utilizados para el experimento, un tripulante estará destinado a su operación, debiendo permanecer en su puesto todo el tiempo; la grúa, luego de la operación de movimiento de pesos deberá llevarse a una misma posición de descanso previamente definida.

Por último, el equipo técnico a cargo del experimento consistirá en uno o más operadores que realizarán los registros de los movimientos de él o los péndulos que se disponen para la medición angular, y por lo menos un operador para asistir en cubierta al movimiento y disposición de los lastres que se utilizan como pesos móviles.

Se deberán verificar condiciones ambientales óptimas o en su defecto realizar el experimento en espacios que reúnan esas características: mar calmo, ausencia de corrientes y ausencia de viento. La verificación previa de las condiciones meteorológicas utilizando los pronósticos disponibles se entiende como una práctica altamente recomendable.

Deberán limitarse los movimientos de superficies libres en tanques u otros espacios como sentinas a los efectos de minimizar su efecto sobre la posición del centro de gravedad del buque sometido a la oscilación natural o forzada. En este sentido, los tanques líquidos preferentemente deberán estar vacíos; una alternativa igualmente válida será que los mismos estén completos, sin superficie libre.