

Humboldt Marine Training

SUPERFICIES LIBRES

Preparado por
Ing. Boris L. GUERRERO B.

Valparaíso, CHILE, 2011.

INDICE DE MATERIAS

Introducción	3
Ejercicio	7
Curvas Cruzadas	8
Curva Estabilidad Estática Inicial.....		13
Corrección Geométrica de la Curva.....		15
Corrección Analítica de la Curva.....		17
Problemas	18

SUPERFICIES LIBRES

Hasta ahora habíamos considerado que los cuerpos permanecen en su lugar al escorarse la nave. Esto puede ser real en los cuerpos sólidos, pero normalmente no se cumple en los cuerpos líquidos, salvo que los estanques estén llenos al 100% o bien estén totalmente vacíos. Ello puede ocurrir en los estanques de lastre, cuando la nave viaja justamente en la Condición de Lastre (Ballast Condition) o bien al estar en una condición de carga total (Full Cargo), en que los estanques de lastre se dejan vacíos. Los estanques de agua dulce suelen llenarse luego de zarpar, pero pronto habrá consumo, por lo que disminuirán la cantidad de líquido. Ello no ocurre en los estanques de combustible, ya que ellos se llenan sólo hasta un 96% de su capacidad total, como máximo, para evitar que rebalsen hidrocarburos al mar.

Al estar un estanque con un volumen parcial, por ejemplo al 50%, tendremos que al existir una escora la superficie tratará de tomar una posición horizontal, con lo que existirá un movimiento de masa de una banda hacia la otra banda. Posteriormente graficaremos este movimiento de masa y los efectos que causa sobre la estabilidad.

Su efecto puede apreciarse en camiones fudres ya que muchos de ellos se volcaron por tomar curvas a alta velocidad. Debido a la fuerza centrífuga se produce un desplazamiento de líquido que produce un momento de volcamiento. Para disminuir este efecto se instalan mamparos longitudinales en los estanques de esos camiones.

En un lavatorio con agua que sostengamos con nuestras manos se nota el efecto de superficie libre, apreciándose dificultad para mantenerlo estabilizado. En cambio en una bandeja para producir cubos de hielo no apreciamos el mismo efecto al estar con líquido en ella.

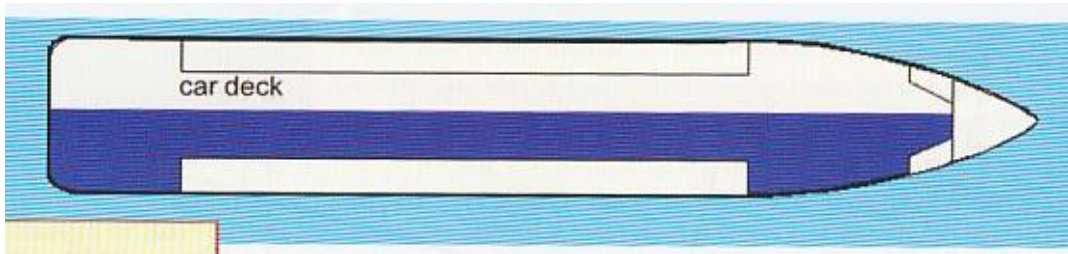
El control de las superficies libres es muy importante, ya que pueden causar situaciones realmente peligrosas en las naves, especialmente en pesqueros,

petroleros, aunque el mayor caso de accidentes catastróficos se ha producido en Ro-Ro y transbordadores. Lo anterior se debe a que esas naves tienen una cubierta para llevar vehículos, las que van de banda a banda y de proa a popa, lo que produce un efecto de superficie libre realmente grande. En las fotos adjuntas se ven esos tipos de naves, indicándose además el tamaño de las cubiertas porta-vehículos.



A Ro-Ro ship which has capsized due to the free surface effect

Últimamente hemos leído en periódicos acerca de accidentes ocurridos en países asiáticos, similares a lo mostrado en el gráfico superior, con cientos de víctimas fatales.

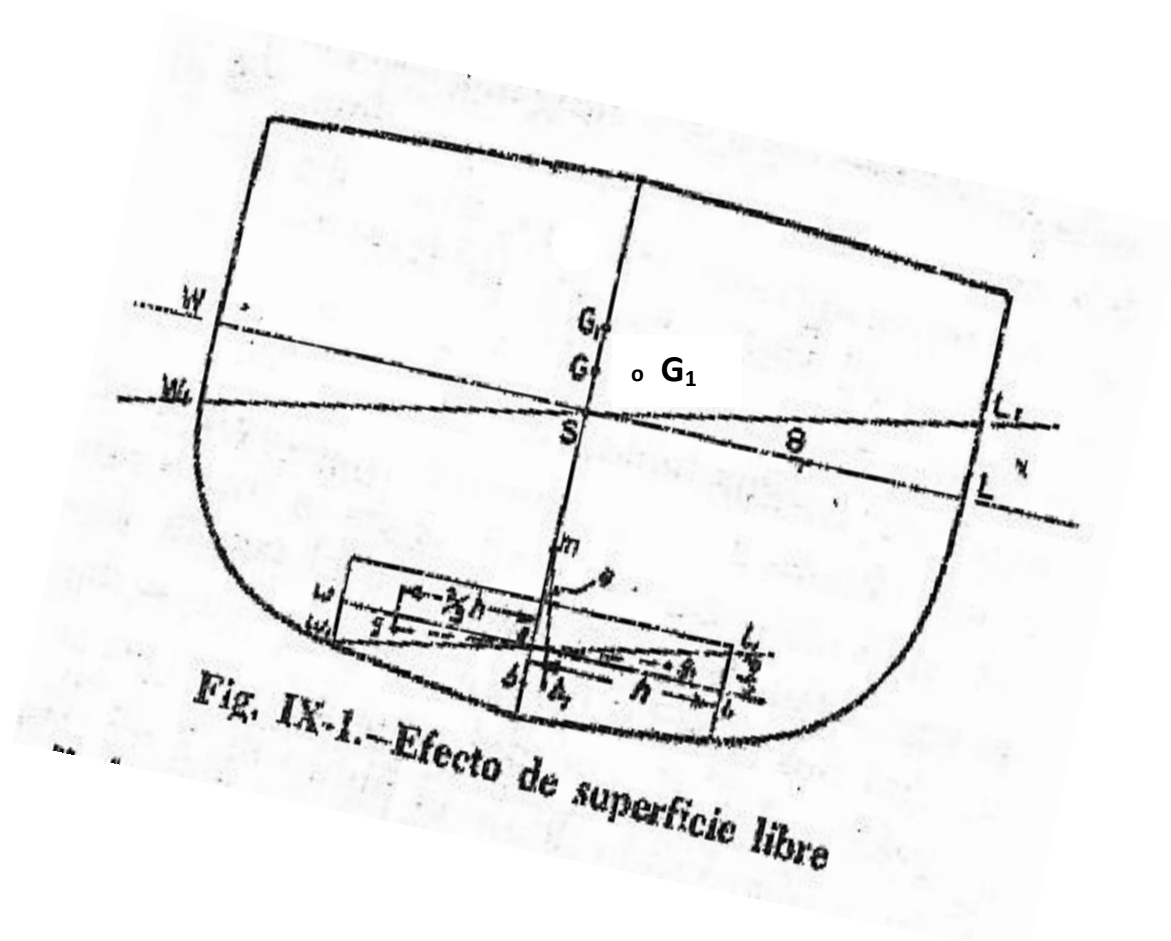


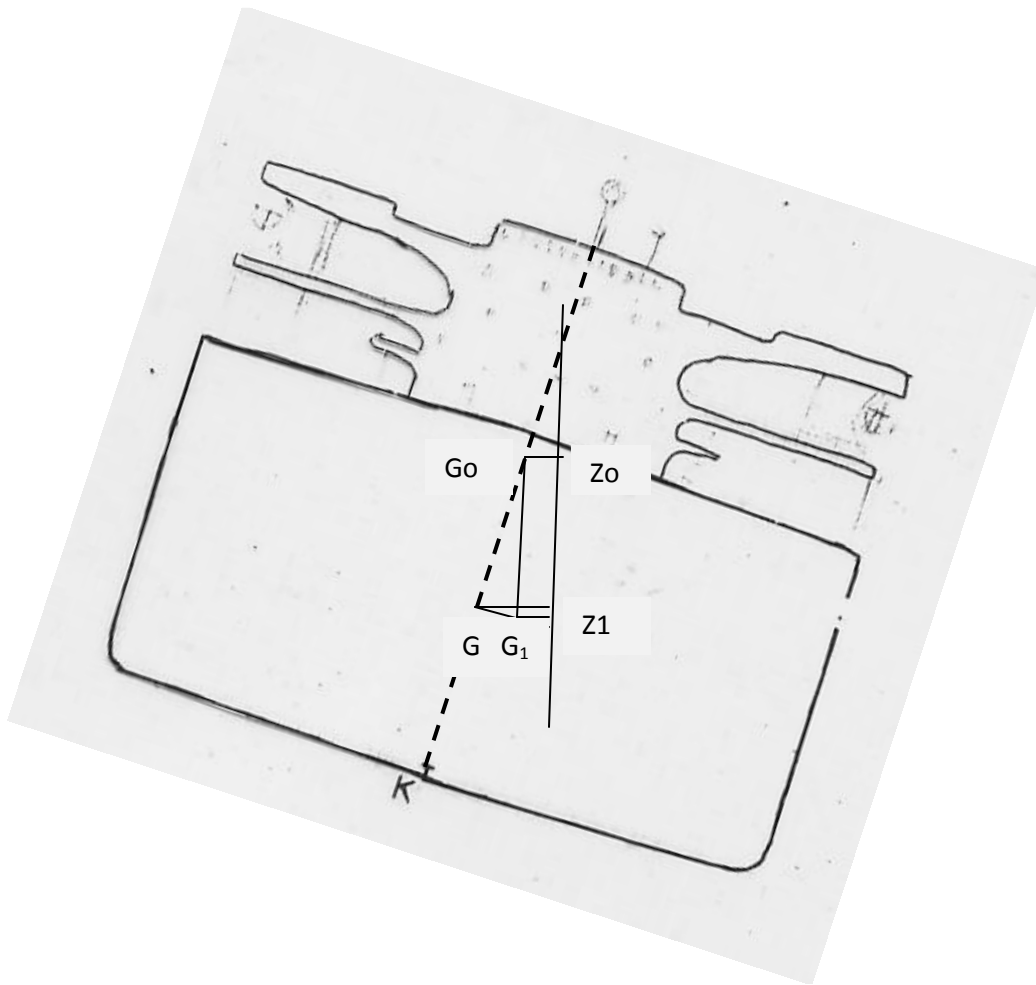
Otro caso importante que podemos mencionar es el accidente ocurrido a una nave que ingresó en el dique flotante VALPARAÍSO III, llamada Golden Hill. Por razones accidentales se inundó una bodega, produciéndose una considerable superficie libre. Esa bodega, por pertenecer a un granelero es de banda a banda. En el momento de volver a flotar la nave, cuando se preparaba para salir del dique, experimentó una considerable escora, que pudo haber producido un accidente catastrófico con resultados difíciles de imaginar, si se hubiera escorado un poco más de lo que realmente ocurrió. En la fotografía que se adjunta puede verse dicho barco con la escora que se produjo.



Veremos cómo se produce el efecto de “superficies libres” y los efectos que se producen sobre la estabilidad de la nave. En el gráfico que se muestra a continuación se muestra una nave que tiene un estanque con superficie libre, la que tiene una escora momentánea, quedando con una línea de agua W_1L_1 . La superficie del líquido en el estanque tratará de tomar una posición horizontal, paralela a W_1L_1 . En el estanque tendremos que una masa líquida (con forma de cuña) que estaba en el lado izquierdo pasará a ocupar una posición en el lado derecho del estanque, o sea se ha experimentado una ‘traslación transversal’ de masa. La dirección de la traslación será gg_1 (línea entre los centros de gravedad de las cuñas).

En centro de gravedad de la nave (G) se trasladará transversalmente, en una línea paralela a gg_1 . (De G a G_1).





En el gráfico superior se muestra la posición del centro de gravedad G_1 que corresponde a la ubicación que toma por el movimiento lateral causado por la traslación de la cuña de agua. Tenemos que en realidad el centro de gravedad de la nave estará oscilando de banda a banda, lo cual hará muy difícil el cálculo de la estabilidad.

Se hizo un análisis teórico para eliminar este inconveniente de tener un centro de gravedad oscilatorio. Podemos ver en el gráfico superior que el brazo de adrizamiento es G_1Z_1 , considerando la superficie libre. Si se levanta una vertical desde G_1 hacia arriba hasta cortar el plano de crujía obtenemos un punto G_0 . Podemos observar que G_1Z_1 es igual a G_0Z_0 . Esto indica que para los efectos de la estabilidad es lo mismo que el centro de gravedad esté en G_1 o que esté en G_0 , ya que en ambos casos existirá el mismo "brazo de adrizamiento". Por eso, por conveniencia se 'supone' que el centro de

gravedad, en vez de considerarse oscilando, estará (virtualmente) en un punto llamado G_0 . Por eso se habla de una “**subida virtual del centro de gravedad**” causada por la superficie libre. O sea, tenemos claro que es una ficción que **suba** el centro de gravedad, pero ‘conviene’ considerarlo así.

Ahora necesitaríamos saber “cuanto” es la subida virtual de G por causa de la correspondiente superficie libre.

Luego de desarrollos matemáticos se llegó a determinar que la subida virtual del centro de gravedad de la nave se puede determinar dividiendo el “momento de inercia de la superficie libre del estanque” con respecto a su eje longitudinal (proa-popa) por el volumen sumergido **de la nave**, considerando además la gravedad específica del líquido, ya que este factor influye en el ‘peso’ de la cuña desplazada, o sea:

$$GG' = \frac{\text{Mto Inercia Superf. Líquido}}{\text{Volumen Sumergido Casco}} \frac{m^4}{m^3}$$

Se define peso específico γ (gama):

$$\gamma = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} \quad \text{ó} \quad \frac{W}{V}$$

Tendremos $V = \frac{W}{\gamma}$ Sustituyendo en la expresión GG' , tendremos

$$GG' = \frac{\text{Mto Inercia Superf. Líquido}}{W} \times \gamma$$

Siendo “ γ ” el peso específico del líquido que contiene el estanque.

Vimos que en el Cuadro de Carga se calculaba el momento de inercia de cada estanque con superficie libre y dicho momento de inercia (m^4) se multiplica por el peso específico del correspondiente líquido, anotándose el valor del producto ($I \times \gamma$) en la columna de la derecha. Si la suma de todos los $I \times \gamma$ la dividíamos por el desplazamiento de la nave obteníamos la subida virtual del centro de gravedad de la nave (GGo). Con ello se obtiene la posición vertical del centro de gravedad G, corregido dicho efecto. Con esa altura KGo se obtendrá la Curva de Estabilidad Final.

CUADRO DE CARGA GRANELERO "ANTONIA"

	Weight	Mid G	Mto Longit	KG	Mto Vertic	Lat G	Mto Lat	I	I x gama
	MT	m	MT m	m	MT m	m	MT m	m4	TM m
Light Weight	7359,0	9,91	72.928	10,02	73737	0,000	0		
Constante	142,0	51,91	7,371	13,05	1853		0		
Provisiones	8,0	80,41	643	16,20	130				
Grab Bucket	34,0	-12,79	-435	17,00	578				
Cargo Hold 1		-65,34	0	8,82	0		0		
Cargo Hold 2		-39,65	0	8,64	0		0		
Cargo Hold 3		-10,88	0	8,64	0		0		
Cargo Hold 4		18,04	0	8,64	0		0		
Cargo Hold 5		45,38	0	8,93	0		0		
TST Cargo 1		-63,27	0	14,28	0		0		
TST Cargo 2		-39,11	0	13,99	0		0		
TST Cargo 3		-10,40	0	13,98	0		0		
TST Cargo 4		18,40	0	13,98	0		0		
TST Cargo 5		45,95	0	13,99	0		0		
FP	1082,0	-82,45	-89211	6,13	6633		0	0,0	0
DB N°1 (P)	502,0	-64,73	-32494	1,55	778		0	0,0	0
DB N°1 (S)	502,0	-64,73	-32494	1,55	778		0	0,0	0
DB N°2 (P)	875,0	-38,91	-34046	1,53	1339		0	0,0	0
DB N°2 (S)	875,0	-38,91	-34046	1,53	1339		0	0,0	0
DB N°3 (P)	480,0	-10,29	-4939	2,21	1061		0	0,0	0
DB N°3 (S)	480,0	-10,29	-4939	2,21	1061		0	0,0	0
DB N°4 (P)	477,0	18,42	8786	2,23	1064		0	0,0	0
DB N°4 (S)	477,0	18,42	8786	2,23	1064		0	0,0	0
DB N°5 (P)	619,0	46,62	28858	2,45	1517		0	0,0	0
DB N°5 (S)	619,0	46,62	28858	2,45	1517		0	0,0	0
TST N°1 (P)	232,0	-63,21	-14665	14,26	3308		0	0,0	0
TST N°1 (S)	232,0	-63,21	-14665	14,26	3308		0	0,0	0
TST N°2 (P)	438,0	-39,07	-17113	13,98	6123		0	0,0	0
TST N°2 (S)	438,0	-39,07	-17113	13,98	6123		0	0,0	0
TST N°3 (P)	441,0	-10,36	-4569	13,98	6165		0	0,0	0
TST N°3 (S)	441,0	-10,36	-4569	13,98	6165		0	0,0	0
TST N°4 (P)	441,0	18,44	8132	13,98	6165		0	0,0	0
TST N°4 (S)	441,0	18,44	8132	13,98	6165		0	0,0	0
TST N°5 (P)	402,0	45,97	18480	13,98	5620		0	0,0	0
TST N°5 (S)	402,0	45,97	18480	13,98	5620		0	0,0	0
A.P. (P)	230,0	83,75	19263	10,14	2332		0	0,0	0
C Hold 3 WB	10351,0	-10,91	-112929	8,53	88294		0	0,0	0
F.W.T. (P)	9,0	84,40	760	11,57	104		0	191,0	191
F.W.T. (S)	9,0	84,40	760	11,57	104		0	191,0	191
F.O.T.N°3 (P)	368,0	-10,47	-3853	0,71	261		0	2123,2	2017
F.O.T.N°3 (S)	368,0	-10,47	-3853	0,71	261		0	2123,2	2017
F.O.T.N°4 (P)	369,0	18,35	6771	0,71	262		0	2123,2	2017
F.O.T.N°4 (S)	369,0	18,35	6771	0,71	262		0	2123,2	2017
F.O.T.N°5 (P)	16,0	44,74	716	0,72	12		0	173,7	165
H.F.O. SETT (S)	16,0	64,40	1030	13,49	216		0	10,5	10
H.F.O. SERV (S)	125,0	62,00	7750	13,49	1686		0	10,5	10
D.O.T.N°5 (P)	95,0	42,55	4042	0,71	67		0	129,4	110
D.O.T. (ATH)	76,0	63,52	4828	1,13	86		0	1088,2	925
D.O.T. SERV(S)	10,0	66,40	664	13,21	132		0	3,5	3
Displacement W	30.850,0	-5,29	-163.125	7,89	243.290	0,000	0		9673,0

W

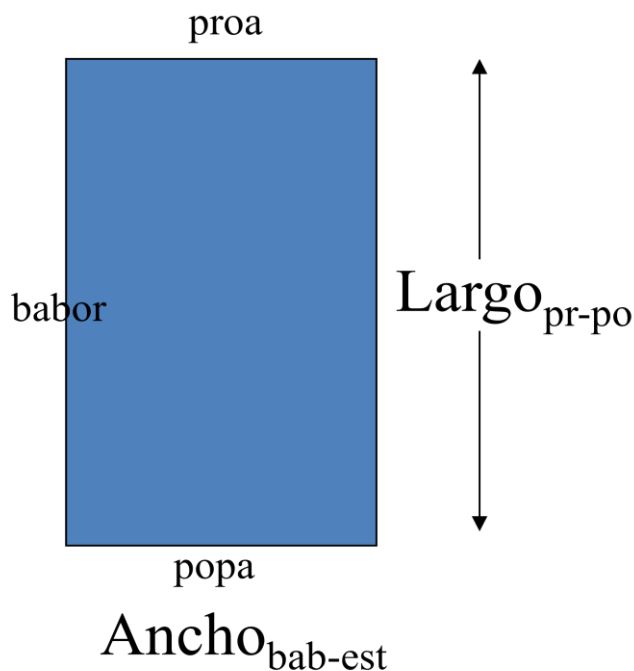
Suma “ $I \times \gamma$ ”

Para determinar el momento de inercia de la superficie libre tendremos 2 procedimientos generales:

- a) Si el estanque tiene una superficie de forma rectangular podremos emplear la expresión matemática ya vista:

$$I = \frac{1}{12} \text{ largo}_{\text{proa-popa}} \times (\text{ancho}_{\text{babor-estr}})^3$$

En la expresión anterior podemos apreciar la importancia que tiene el ancho (babor-estribor) del estanque con superficie libre, ya que su medida está elevada a la **tercera potencia**. Esto justifica el caso citado al principio de este capítulo, en que se relataba el caso de accidentes catastróficos ocurridos en barcos Ro-Ro y en el caso de graneleros, los que tienen bodegas que van de banda a banda.



Si se tienen varios estanques con superficies libres, la subida virtual total será la sumatoria de los efectos parciales de cada estanque.

Recuerde que siempre el efecto de superficie libre será una “pérdida de estabilidad”.

- b) Normalmente una gran parte de los estanques tienen formas diferentes a un rectángulo, en su superficie libre. Los astilleros entregan curvas o tablas que permiten calcular fácilmente el valor de los correspondientes momentos de inercia. Ya que la forma de la superficie del líquido varía con la cantidad de líquido que contienen, dichos valores se expresan en función de la sonda del estanque.

A continuación se muestra un cuadro con características de un estanque de un Reefer. De él se puede obtener la siguiente información, en función de la sonda:

Volumen

Altura del centro de gravedad del líquido sobre la quilla (Kg)

Posición longitudinal del centro de gravedad del líquido con respecto a la sección media (Mid g)

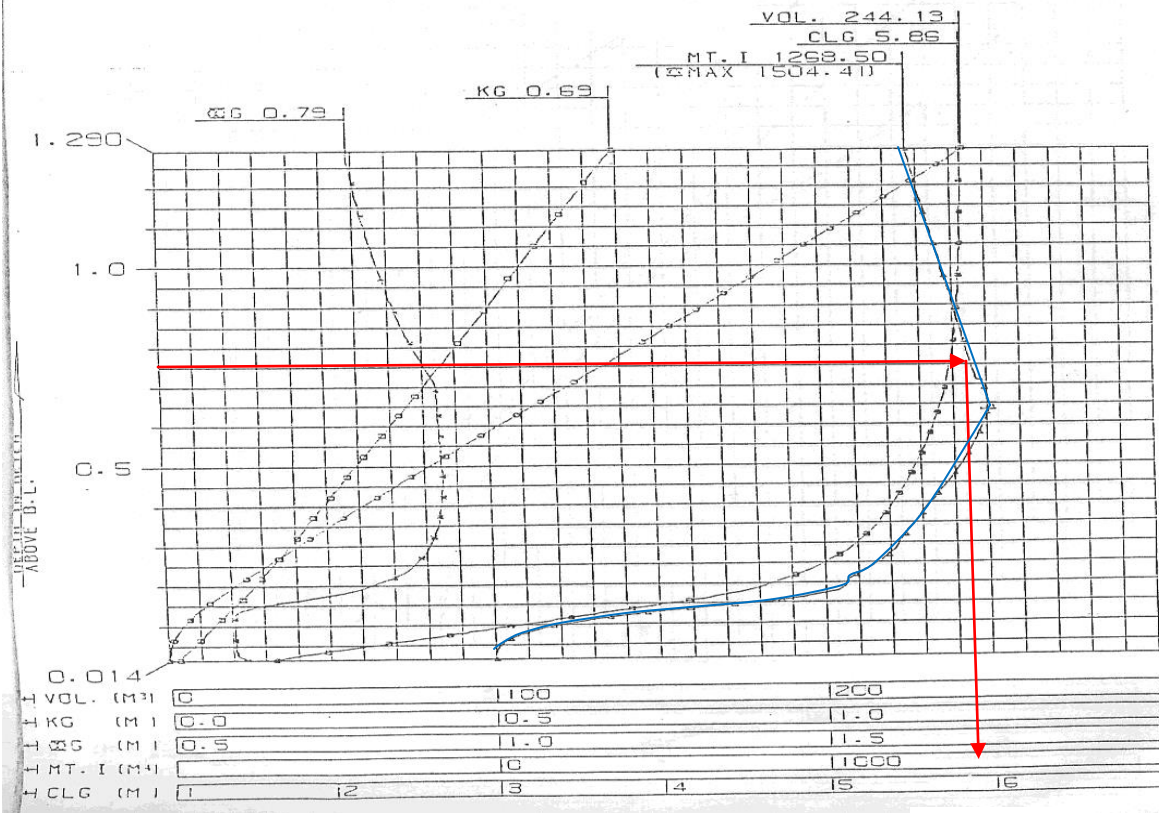
Momento de inercia de la superficie del líquido (m^4).

Posición lateral del centro de gravedad del líquido con respecto al plano de crujía.

Como ejemplo se determinará el momento de inercia del estanque de lastre N° 3 de estribor, si la sonda es de 0,75 m.

Entrando con 0,75 m en el eje de las ordenadas llegamos a interceptar la curva del momento de inercia (curva azul), obteniéndose un valor de $1.440 m^4$ en la escala situada en la parte posterior.

NO. 3 W. B. T. (S)
 (FR. 80.00 ~ 112.00)



1440 m⁴

Los valores obtenidos de estas curvas servirán para entrarlos al cuadro de carga, respecto al estanque que se analiza.

PROBLEMA:

Una Barcaza con forma de caja desplaza 238 TM en agua de mar.

$$KG = 3,51 \text{ m}$$

$$KM = 4,62 \text{ m}$$

Un estanque tiene superficie libre conteniendo D.O. de g.e. 0,845, siendo su largo proa/popa 4,23 m, su ancho babor/estribor 6,14 m y su alto de 1,86 m.

Calcular la posición final de "G", o sea KG_0

SOLUCIÓN :

Momento de Inercia "i" de la superficie es:

$$i = 1/12 \text{ largo}_{\text{proa-popa}} \times (\text{ancho}_{\text{babor-estribor}})^3$$

$$i = 4,23 \times 6,14 / 12 = 81,60 \text{ m}^4$$

$$GG_0 = 81,60 \times 0,845 / 238 = 0,29 \text{ m}$$

$$KG_0 = KG + GG_0 = 3,51 + 0,29 = \mathbf{3,80 \text{ m}}$$

PROBLEMA:

El desplazamiento de una nave en agua de mar es de 40.000 TM. Y su distancia metacéntrica GM es de 1,55 m. (sin considerar superficies libres).

Un estanque de D.O. de g.e. 0,846 tiene superficie libre y tiene ocupada un 50% de su capacidad. Su longitud proa-popa es de 25,31

m, su ancho babor – estribor es de 13,22 m. y su profundidad es de 5,4 m.

Calcular GoM.

RESPUESTA:

$$GGo = l \times \gamma / W = (25,31 \times 13,22^3) \times 0,846 / (12 \times 40.000) = \mathbf{0,12 \text{ m}}$$

$$GoM = 1,55\text{m} - 0,12 \text{ m} = \mathbf{1,43 \text{ m}}$$

Análisis dimensional $\cancel{\text{m}^4} \times \cancel{\text{TM}/\cancel{\text{m}^3}} / \cancel{\text{TM}} \rightarrow \text{m}$

PROBLEMA:

El granelero “Antonia” navega en agua de mar teniendo un W de 27.559 TM. y su GM es de 0.99 m

Sufre los efectos de un incendio, causando que en la extinción del fuego se inunde un compartimiento con 300 TM de agua, cuyas medidas son: 20 m (proa – popa) y 15 m (bb – eb). El centro de gravedad del líquido queda 2,23 m sobre la quilla, en cruzía.

Determinar la posición final de Go y el GoM final.

SOLUCIÓN:

Antes del incendio:

$$KM = 12,89 \text{ m} \quad (\text{de Hidrostáticas})$$

$$KGo = KM - GoM = 12,89 \text{ m} - 0,99 \text{ m} = 11,90 \text{ m}$$

		KG	Mto Vert
W ₁	27.559 TM	11,90 m	327.952 TMm
Agua Incendio	300 TM	2,23 m	669 TMm
W ₂	27.859 TM	11,80 m	328.621 TMm

$$GGo = 15 \cdot 15 \cdot 15 \cdot 20 \cdot 1,025 / 27.859 / 12 = 0,207 \text{ m}$$

$$KGo = 11,80 \text{ m} + 0,207 \text{ m} = 12,01 \text{ m}$$

De las Hidrostáticas obtenemos KM para W_2

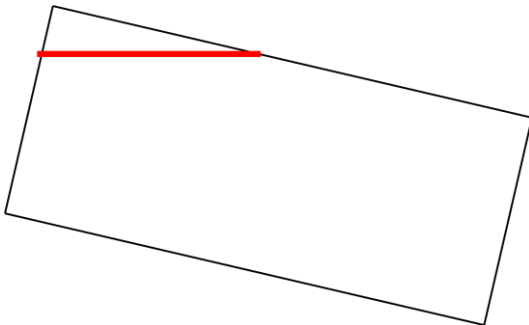
$$KM_2 = 12,83 \text{ m}$$

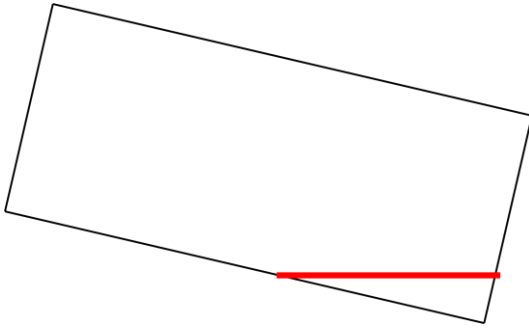
$$KG_2 = 12,01 \text{ m}$$

$$\mathbf{GoM_2 = 0.82 \text{ m}}$$

EMBOLSILLAMIENTO

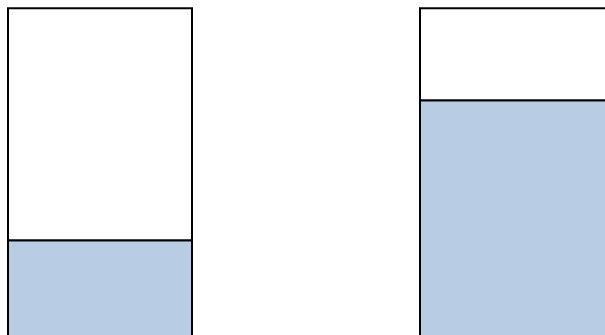
Es la disminución del efecto de las superficies libres en estanques “casi” llenos o “casi” vacíos al producirse una escora en la nave, como se aprecia en los dos gráficos que se acompañan.



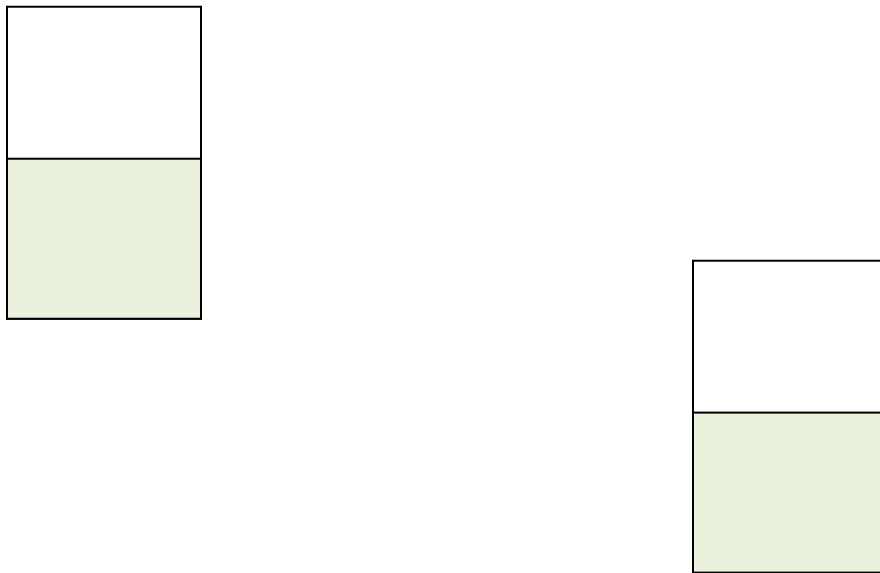


Al estar adrizada la nave la superficie del líquido ocupara un ancho de banda a banda, teniendo por lo tanto un efecto de superficie libre considerable. Pero al ocurrir una moderada escora tendremos una considerable disminución de dicho ancho. Ya que el efecto de superficie libre es función del ancho (babor-estribor) elevado a la tercera potencia, el efecto de superficie en un estanque con embolsillamiento podrá llegar a ser casi despreciable, por lo que normalmente no se considera.

El “efecto superficie libre” es independiente de la cantidad de líquido, mientras no haya embolsillamiento. Lo que interesa es analizar el tamaño que tomará la cuña de agua que se produce a una cierta escora. En los gráficos que se muestran podemos ver dos estanques de las mismas medidas, aunque tienen distinto nivel de un mismo líquido. Ambos tendrán el “mismo” efecto de superficie libre.



Otro caso se indica a continuación. Los dos estanques que se muestran son de las mismas medidas y contienen el mismo tipo de líquido, pero uno está en la banda de estribor y en una posición más baja, con respecto a la quilla. Ambos producirán también el mismo efecto sobre la estabilidad de la nave, ya que producirán iguales cuñas de agua a una misma escora.



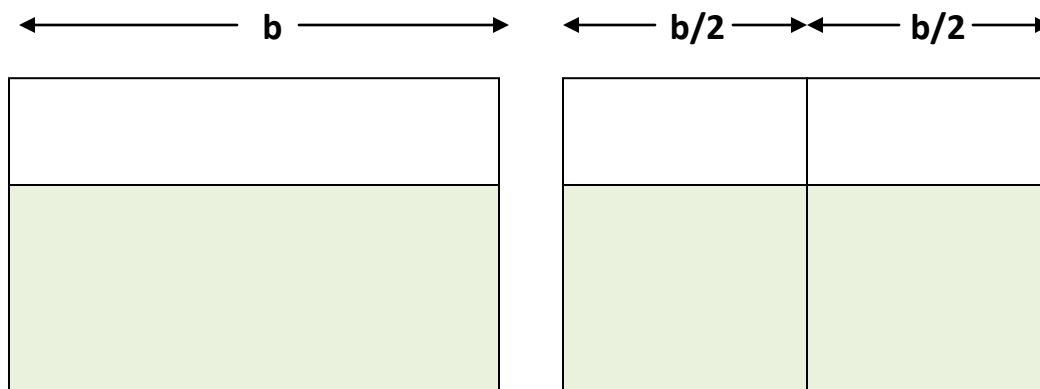
Los dos casos anteriores pueden justificarse del análisis de la expresión matemática que rige la subida virtual del centro de gravedad de la nave, ya que ésta considera en su numerador sólo el momento de inercia de la superficie libre y en el denominador el volumen sumergido del barco, sin ninguna consideración de la ubicación de dicha superficie libre.

El efecto de pérdida de estabilidad por efecto de las superficies libres también ocurre en sentido longitudinal, o sea por desplazamiento de cuñas de líquido hacia proa o popa, lo que causará una pérdida de estabilidad

'longitudinal'. Dado que las naves tienen una gran estabilidad longitudinal, está pérdida de estabilidad no es necesario que sea considerada.

Podemos apreciar que las superficies libres son, en general, indeseables para la buena estabilidad de una nave. Dado que normalmente un buque tiene una gran cantidad de estanques, la pérdida de estabilidad puede ser importante si muchos de ellos tienen superficies libres. Por lo anterior los diseñadores de las naves deben minimizar los efectos que dichas superficies libres puedan causar sobre la estabilidad. El principal método consiste en dividir los estanques en otros de menor tamaño, tanto en sentido transversal como en sentido longitudinal.

Consideremos que un estanque de ancho babor-estribor mide "b" y que instala un mamparo longitudinal en su mitad, originando dos estanques iguales. Analizaremos la nueva subida virtual por efecto de las dos superficies libres que se han originado.

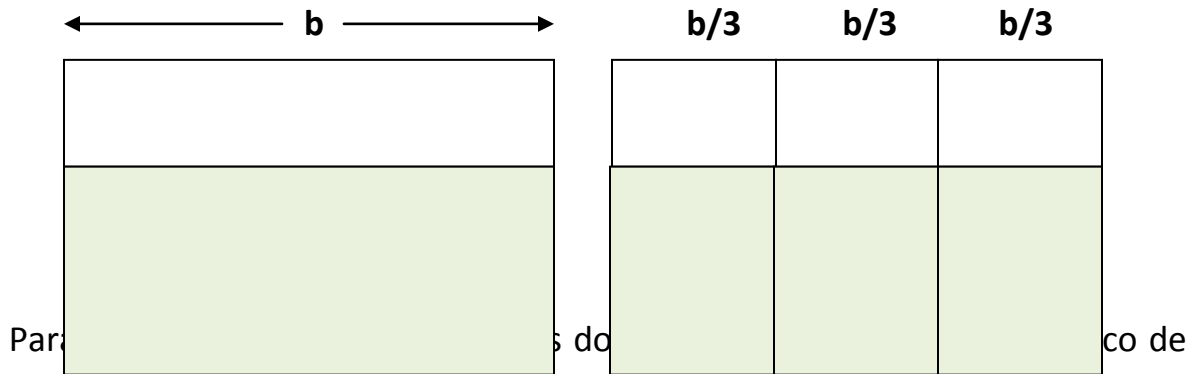


Para el estanque sin mamparo intermedio (gráfico de lado izquierdo) el momento de inercia de la superficie libre será función de b^3 , como vimos previamente.

Para cada estanque dividido por el mamparo intermedio (gráfico de lado derecho) el momento de inercia de la superficie libre será función de $(b/2)^3$, o sea de $b^3/8$. Esto significa que la subida virtual de G será la 'octava' parte que

en el estanque original. Pero como ahora hay dos estanques el efecto de subida virtual será dos octavos, o sea **un cuarto** del estanque completo.

Un análisis similar podríamos hacerlo para el caso que se instalen dos mamparos longitudinales, lo que originaría tres estanques.



lado derecho) el momento de inercia de la superficie libre será función de $(b/3)^3$, o sea de $b^3/27$. Esto significa que la subida virtual de G será ‘un veintisieteavo’ parte que en el estanque original. Pero como ahora hay tres estanques el efecto de subida virtual será tres veintisieteavos, o sea **un noveno** del estanque completo.

De lo anterior podríamos deducir una fórmula general:

“La reducción del efecto de superficie libre por efecto de divisiones del estanque será el número de estanques generados elevado al cuadrado”, o sea:

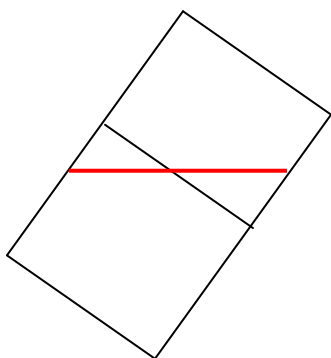
$$(N^{\circ} \text{ divisiones})^2$$

Otro tipo de divisiones que se encuentran en los estanques está constituido por mamparos transversales y longitudinales que tienen ciertas perforaciones que los comunica entre sí. Estos mamparos tienen dos objetivos básicos. El primero es aumentar la resistencia estructural por este enjambre de planchas. El segundo objetivo es disminuir el efecto de superficies libres, en un aspecto que podríamos llamar ‘dinámico’. Al ocurrir

una escora en un estanque con superficie libre, el líquido ‘demorará’ un cierto tiempo en escurrir y formar la cuña líquida, lo que “disminuirá” el efecto de superficie libre. Cuando ocurra la escora hacia la banda contraria no habrá alcanzado a pasar todo el líquido que trata de tomar una superficie con forma horizontal, lo que constituirá un verdadero medio de atenuar el indeseable efecto de pérdida de estabilidad. Además estas perforaciones permiten el tránsito humano entre las partes del estanque para su inspección, reparaciones, mantención en general.

Para los efectos de cálculo del efecto de pérdida de estabilidad no se consideran estos mamparos perforados como un medio de disminución del efecto de superficie libre. Ello se debe a que si perdura la escora, como es el caso de una escora permanente, el líquido tendrá el tiempo para formar la cuña completa.

Un caso que debe tenerse en consideración es el que se produce en estanques profundos u otros compartimientos de considerable altura, en caso que tengan líquidos con superficies libres y si se producen escoras considerables. En el gráfico incluido a continuación se muestra el caso. Ya que el ancho babor-estribor puede aumentar en forma considerable y dado que el momento de inercia depende del ancho elevado a la tercera potencia, el efecto de superficie libre puede aumentar considerablemente.



Norma OMI acerca de Superficies Libres

Las Normas OMI establecen que todo estanque que va a variar su carga durante la navegación, debe considerarse con su máximo Momento de Inercia en todos los cálculos de estabilidad correspondientes a dicha navegación.

Esto es importante si se va a deslastrar estanques y para los estanques de Fuel Oil que alimentarán los estanques diarios durante la navegación.