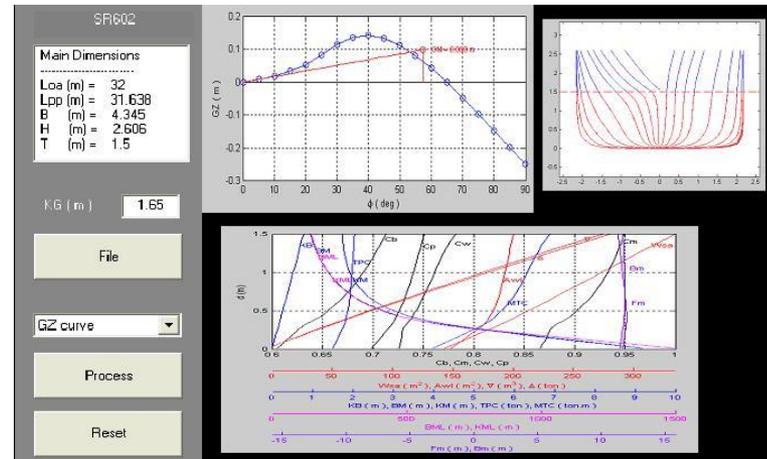
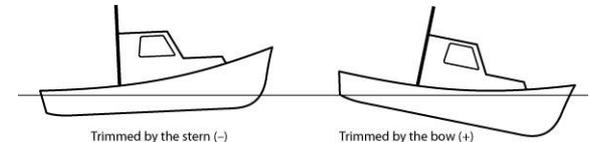


III. Hidrostática y Estabilidad

Objetivos:

1. Recordar algunos principios elementales asociados a: el equilibrio estático en estructuras flotantes, al cálculo de pesos en una estructura compuesta, el cálculo del centro de gravedad de una estructura compuesta, la determinación de la posición del centro de flotación, y el efecto de fuerzas perturbadoras sobre la estabilidad transversal.
2. Definir que es el metacentro transversal y como se determina.
3. Estudiar la estabilidad transversal intacta a ángulos de escora pequeños.
4. Describir las curvas hidrostáticas.
5. Analizar el efecto de superficie libre y del movimiento transversal de pesos sobre la estabilidad transversal intacta.
6. Estudiar la estabilidad transversal intacta a ángulos de escora no pequeños.
7. Describir el experimento de inclinación y reconocer su importancia.
8. Describir brevemente los diferentes estados de avería que pueden llevar a que un buque se hunda o zozobre.
9. Mencionar las regulaciones con respecto a la estabilidad transversal intacta en buques de acuerdo a la IMO.
10. Mencionar algunos métodos para mejorar la estabilidad de un buque.



III. Hidrostática y Estabilidad

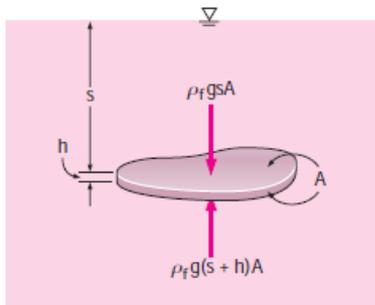
1. Principios elementales

Conceptos de equilibrio

En general, un cuerpo rígido se considera que está en un estado de equilibrio estático cuando todas las fuerzas y momentos resultantes, actuando sobre el cuerpo, son iguales a cero.

¿Qué es la fuerza de flotabilidad o de empuje (buoyant force, F_B)?

Es la fuerza que ejerce un fluido en dirección contraria al peso en un cuerpo parcial o totalmente sumergido y que tiende a sustentar al cuerpo.



$$F_B = \rho_f g h A = \rho_f g \nabla$$

Dónde: ρ_f es la densidad del fluido, g la aceleración gravitatoria, y ∇ el volumen del cuerpo plano sumergido. Es evidente que F_B no es más que el peso del fluido, cuyo volumen es igual al del cuerpo plano sumergido.

¿Qué establece el principio de Arquímedes?

Establece que el empuje (F_B) sobre un cuerpo sumergido en un fluido es igual al peso del fluido desplazado por dicho cuerpo, y actúa hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado. Esto básicamente es lo que describe la ecuación anterior

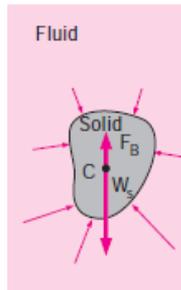
$$F_B = \rho_f g \nabla$$

III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Conceptos de equilibrio

¿Qué establece el principio de Arquímedes?



Sí consideramos que un cuerpo sumergido de geometría arbitraria se encuentra en equilibrio estático, del balance de fuerzas tendríamos que

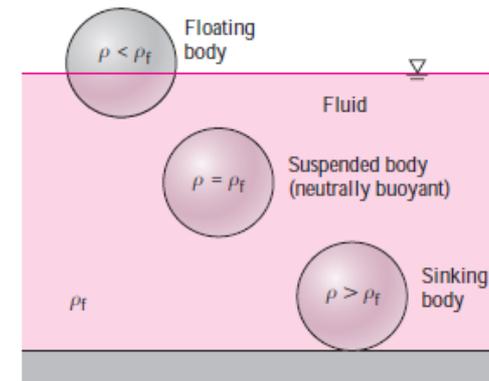
$$F_B - W = 0$$

$$F_B = W \rightarrow \rho_f g \nabla_{sum.} = \rho_{prom.,cuerpo} g \nabla_{total}$$

Dónde: $\rho_{prom.,cuerpo}$ es la densidad promedio del cuerpo sumergido, $\nabla_{sum.}$ es el volumen sumergido del cuerpo, y ∇_{total} es el volumen total del cuerpo sumergido.

De la ecuación anterior podemos deducir que:

- ✓ Sí la fuerza de flotabilidad es mayor que el peso del cuerpo, este flotará.
- ✓ Sí la fuerza de flotabilidad es menor que el peso del cuerpo, este se hundirá.
- ✓ Sí la fuerza de flotabilidad es igual al peso del cuerpo, este se encontrará suspendido en el fluido.

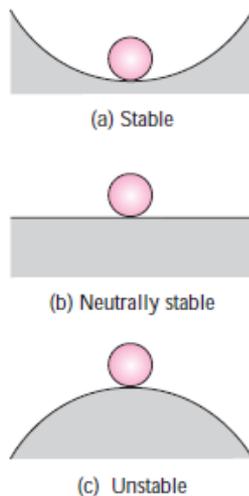


III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Conceptos de equilibrio

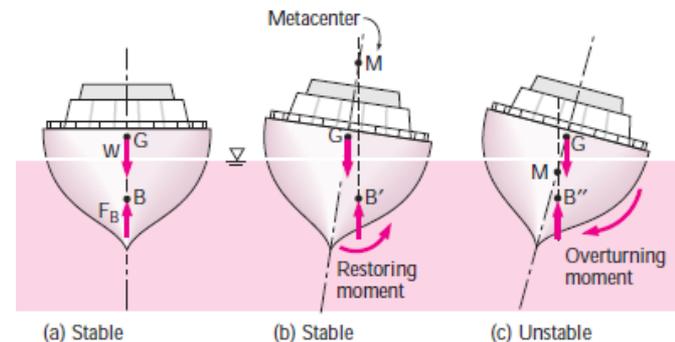
¿Qué se entiende por equilibrio estable, neutramente estable, e inestable en el caso de cuerpos flotantes?



El criterio de estabilidad, en general, en el caso de cuerpos flotantes es el siguiente:

- ✓ Sí el centro de gravedad del cuerpo (G) está directamente debajo del centro de flotación (B), el cuerpo siempre es estable.

- ✓ Sí el centro de gravedad del cuerpo coincide con el centro de flotación, el cuerpo es neutralmente estable.
- ✓ Sí el centro de gravedad del cuerpo está por encima del centro de flotación, el cuerpo puede ser o no estable. Esto último producto de sí existe un momento restaurador.



III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Conceptos de equilibrio

¿Qué es el desplazamiento Δ ?

Típicamente a la fuerza de empuje, que como se ha visto no es más que el peso del volumen de agua desplazado, suele llamársele desplazamiento. Y el desplazamiento suele expresarse en unidades de toneladas de fuerza métrica (*tonnef* o t_f). Una tonelada de fuerza métrica es igual a 1000 kgf o a 9.81 kN. Por lo tanto, el desplazamiento podría expresarse como

$$\Delta = \rho' \nabla$$

El desplazamiento puede obtenerse de las curvas de líneas de formas, a partir del volumen desplazado a un calado determinado.

Donde $\rho' = \rho g$ y está en unidades de t_f/m^3 .
Típicamente el agua de mar tiene un valor de $\rho' = 1.026 t_f/m^3$.

Pesos y posición del centro de gravedad en un buque

La posición del centro de gravedad (*CG* o simplemente *G*) puede ser calculada o determinada de forma experimental. El peso (*W*) y el centro de gravedad de un buque que no ha sido puesto a flote puede ser estimado solo a partir de la sumatoria de los pesos individuales y de los centroides de dichos pesos con respecto a ciertos planos de referencia. En general, el cálculo de la posición del centro de gravedad de cualquier objeto, es obtenido al dividirlo en un número de componentes individuales o partículas, siendo conocido el peso y centro de gravedad de cada partícula. El momento de cada partícula es calculado al multiplicar su peso por la distancia al plano de referencia, y una vez se suman todos los momentos que hacen cada una de las partículas individuales, este resultado es dividido por el peso total de todas las partículas; obteniéndose así la distancia del centro de gravedad al plano de referencia.

III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Pesos y posición del centro de gravedad en un buque

Por ejemplo la posición vertical del centro de masa con respecto al plano de la línea base (VCG o $KG_{estructura\ flotante}$) estaría dada por

$$KG_{estructura\ flotante} = \left(\sum_{i=1}^N m_i KG_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N m_i \right)$$

Dónde: m_i representa la masa de un elemento en particular, KG_i es la distancia del centro de masa de un elemento en particular con respecto a la línea base, y N es la cantidad de elementos totales que constituyen la estructura flotante.

La localización del centro de masa es determinada completamente cuando se ha establecido su distancia con respecto a tres planos de referencia. En el caso de buques, estos tres planos de referencia generalmente son:

- Un plano horizontal que pasa a través de la línea base (plano de línea base) a partir del cual se localiza la posición vertical del centro de gravedad (VCG).
- Un plano transversal a través de *amidships* o a través de la perpendicular de proa a partir del cual se localiza la posición longitudinal del centro de gravedad (LCG).
- Un plano longitudinal a través de la línea de centro (plano de línea de centro) a partir del cual se localiza la posición transversal del centro de gravedad (TCG).

III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Pesos y posición del centro de gravedad en un buque

Ha de decirse que durante la estimación de peso se realizan muchas aproximaciones y esto llevara evidentemente a ciertos errores. Casi siempre dichos erros son de omisión, por ejemplo, el acero que se recibe de la fábrica es usualmente más pesado producto de la tolerancia que se utiliza. Esto último hace evidente que es esencial incluir márgenes de error en la estimación de pesos. Dichos márgenes de error se derivan de la experiencia del estimador y de información disponible.

Igualmente se consideran márgenes de error en la posición del centro de gravedad de la embarcación

Table 1. Sample summaries of loading condition weights and centers.

	Post-Panamax Containership				Aframax Tanker				132,000 m3 LNG (Membrane Type) Carrier				Handymax Bulk Carrier			
	Mass*	Displacement [†]	VCG [‡]	LCG**	Mass	Displacement	VCG	LCG	Mass	Displacement	VCG	LCG	Mass	Displacement	VCG	LCG
Lightship	24,510	240,223	61%	-7%	19,004	186,258	53%	-5%	28,017	274,595	75%	-5%	7289	71,439	73%	-7%
Full Load	76,318	747,993	71%	-3%	129,032	1,264,643	57%	3%	99,899	979,110	73%	0%	35,453	347,475	60%	2%
Ballast	49,275	482,944	45%	-4%	62,070	608,348	39%	1%	75,561	740,573	64%	1%	25,944	254,277	56%	2%
LBP (m)	262				239				275				160			
Depth (m)	24.3				21.0				20.1				13.6			

*In tonnes.

[†]In Kilo-Newtons.

[‡]Percent of depth.

**Percent of LBP forward (+) or aft (-) of midships.

Table 2 Weight margins.

Margin of Weight (in percent of lightship weight)	
Cargo ships	1.5–2.5
Tankers	1.5–2.5
Cargo–passenger ships	2.0–3.0
Large passenger ships	2.5–3.5
Small naval vessels	6.0–7.0
Large naval vessels	3.5–7.0
Margin in VCG Meters	
Cargo ships	0.15–0.23
Tankers	0.15
Cargo–passenger ships	0.15–0.23
Large passenger ships	0.23–0.30
Small naval vessels	0.15–0.23
Large naval vessels	0.15–0.23

III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Pesos y posición del centro de gravedad en un buque

Una vez el buque está a flote, el peso y centro de gravedad pueden ser establecidos por medio del experimento de inclinación.

Posición del centro de empuje o de flotación en un buque

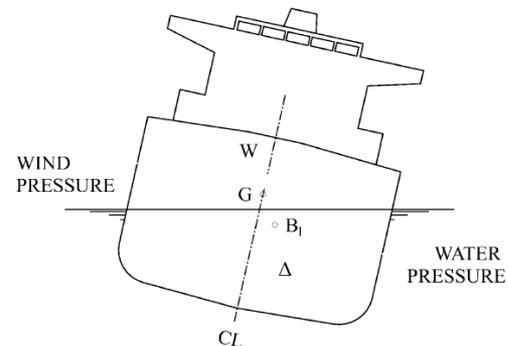
La posición del centro de flotación es el punto sobre el cual actúa la fuerza de flotabilidad, este punto es el centro de gravedad del líquido desplazado (centroide del volumen sumergido) y debe ser definido con respecto a los tres planos de referencia empleados para definir al centro de masa de la embarcación.

Fuerzas perturbadoras

La magnitud de las fuerzas perturbadoras, y los consecuentes momentos de escora, que pueden actuar sobre un buque determinan la magnitud de los momentos que deben generar la fuerza del peso y de empuje en orden para prevenir zozobra o escoramiento excesivo.

Algunas fuerzas perturbadoras que afectan la estabilidad transversal son las siguientes:

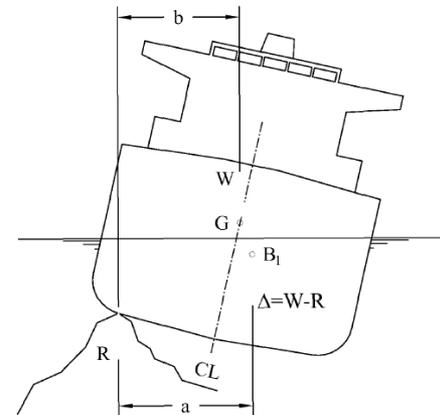
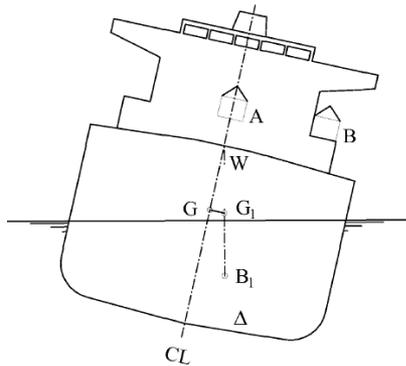
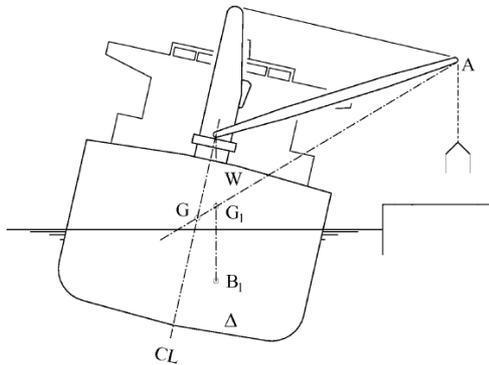
- Vientos en los costados de la embarcación.
- Levantamiento de pesos pesados por los costados.
- Giros a altas velocidades.
- Encallamientos.
- Empujes producto de remolcadoras.



III. Hidrostática y Estabilidad

1. Principios elementales

Fuerzas perturbadoras



Algunas fuerzas perturbadoras internas incluyen:

- El cambio de posición de pesos en dirección *athwartship*.
- Aguas atrapadas en alguna cubierta.
- Efecto de superficie libre de líquidos.

III. Hidrostática y Estabilidad

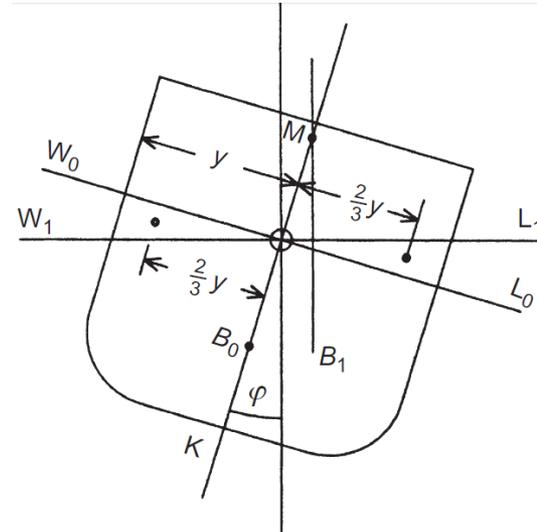
2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

Metacentro y altura metacéntrica

Una medida de la estabilidad de los cuerpos flotantes es la altura metacéntrica (GM), la cuál es la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro (M). El metacentro es el punto de intercepción entre la línea de acción de la fuerza de flotación antes y después de la rotación. El metacentro puede ser considerado como un punto fijo para la mayoría de las geometrías para ángulos de inclinación (escora) pequeños (entre 7 y 10 grados).

Localización del metacentro transversal y de la altura metacéntrica para ángulos de escora pequeños

Como se hace evidente en la figura siguiente, el volumen que emerge y el que inmerge deben ser iguales para un desplazamiento de volumen constante por parte de la estructura flotante.



Para ángulos pequeños las secciones W_0OW_1 y L_0OL_1 son aproximadamente triangulares. Y por lo tanto dicha área inmergida o emergida será igual:

$$\frac{1}{2}y(y \tan \varphi) = \frac{y^2}{2} \tan \varphi$$

Consecuentemente el volumen total asociado a cada sección triangular será igual a:

$$\int \frac{1}{2}y^2 \tan \varphi dx$$

III. Hidrostática y Estabilidad

2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

Localización del metacentro transversal y de la altura metacéntrica para ángulos de escora pequeños

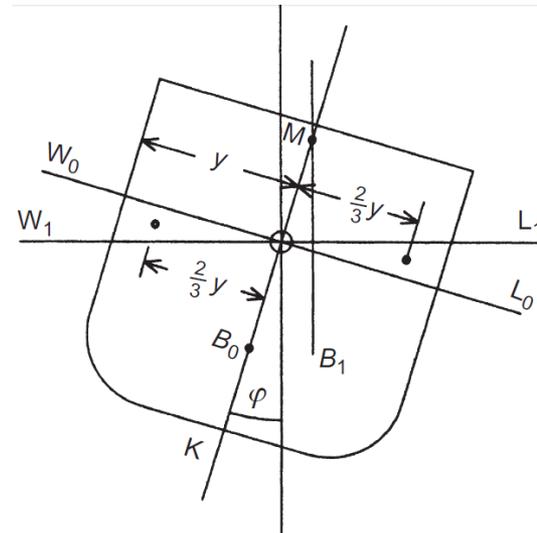
Ahora bien, este volumen se mueve de la sección que emerge hacia la sección que inmerge creando un cambio en el centro de flotación producto del movimiento.

$$\left(\int \frac{1}{2} y^2 \tan \varphi dx \right) \frac{4}{3} y = \tan \varphi \int \frac{2}{3} y^3 dx$$

La expresión dentro de la integral representa el segundo momento de área (momento de inercia, I) del área paralela a la superficie del fluido en torno a la línea de centro, a una profundidad o calado dado.

Por otra parte, producto de equilibrio se tendrá que:

$$\nabla B_0 B_1 = I \tan \varphi$$



Aquí ∇ representa el volumen total de agua desplazado por el elemento flotante. Y de acuerdo a la figura anterior:

$$\tan \varphi = \frac{B_0 B_1}{B_0 M}$$

Consecuentemente:

$$B_0 M = \frac{I}{\nabla}$$

III. Hidrostática y Estabilidad

2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

Localización del metacentro transversal y de la altura metacéntrica para ángulos de escora pequeños

De la figura también se puede deducir que:

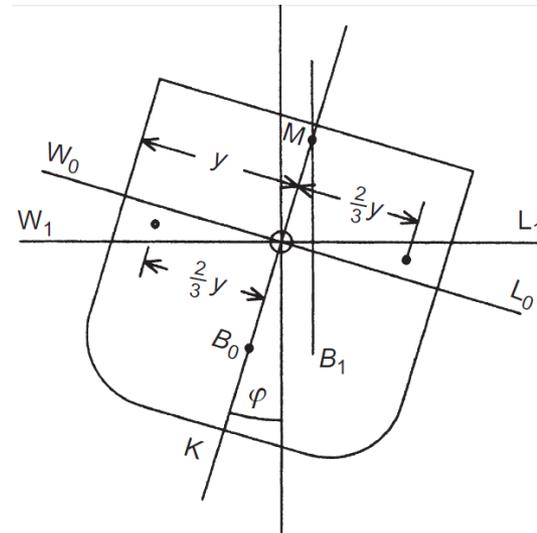
$$KM = KB_0 + B_0M$$

Y de igual forma si se conoce la distancia de la línea base al centro de masa del elemento flotante se podría determinar la altura metacéntrica:

$$GM = KM - KG$$

Estabilidad inicial

La estabilidad inicial es aquella que se considera cuando un buque está en posición vertical o muy cerca de esta posición (ángulos de escora pequeños).



La estabilidad inicial depende de la altura metacéntrica GM , si esta cantidad es positiva se considera que el buque es estable; de lo contrario, si es negativa, se considera que es inestable.

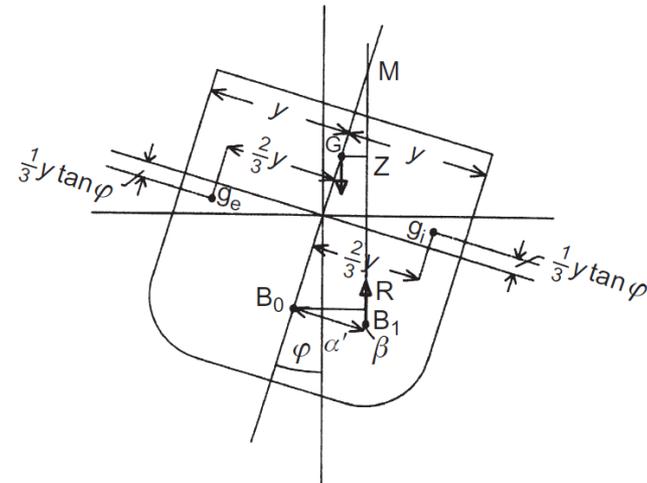
III. Hidrostática y Estabilidad

2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

Brazo adrizante (*righting arm*)

Para determinar el momento hecho por el peso y la fuerza de flotación, ya sea restaurador o de vuelco, ante un determinado ángulo de escora, se requiere de la distancia transversal entre el punto de aplicación del peso (centro de gravedad) y el punto de aplicación de la fuerza de empuje (centro de flotación) una vez ha sido perturbado el buque. Dicha distancia se conoce como brazo adrizante.

En el caso de que se tengan ángulos de escora pequeños y de que se trate de un *wall side ship* (buque en donde se observa que sus costados son rectos para una línea de flotación dada sobre toda su eslora, aquí cualquier curvatura del pantoque o de otro tipo no debe ser expuesta por la inclinación ni el eje de la cubierta debe encontrarse inmerso).



Para este caso en particular se considerara que al escorarse la estructura flotante el centro de masa se mantendrá en su posición original, es decir no hay movimientos transversales de masas. De igual forma, tras darse el desplazamiento angular, el centro de flotación cambia de posición de B_0 a B_1 y $B_0R = \alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi$, $\alpha = B_0B_1'$, $\beta = B_1'R$.

III. Hidrostática y Estabilidad

2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

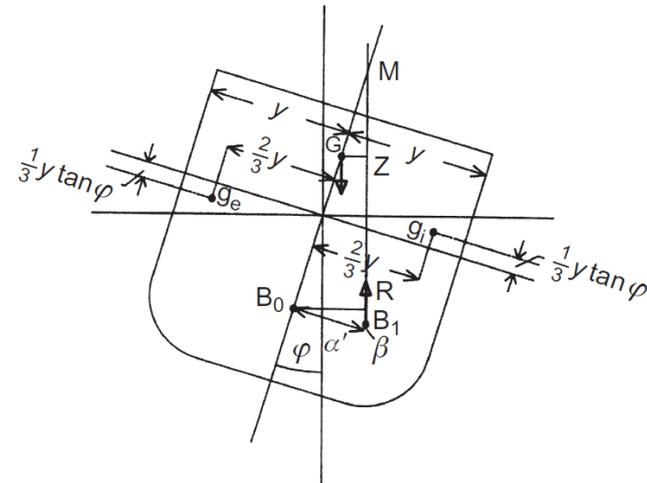
Brazo adrizante (righting arm)

Ahora bien, como se vio previamente el cambio en el centro de flotación producto del movimiento, produce un momento con un brazo perpendicular a la línea de centro del cuerpo flotante (aquí dimensionalmente no se aprecia ya que habría que multiplicar la expresión anterior por la densidad del fluido):

$$\left(\int \frac{1}{2} y^2 \tan \varphi \, dx \right) \frac{4}{3} y = \tan \varphi \int \frac{2}{3} y^3 \, dx = I \tan \varphi$$

Lo cuál por equilibrio debe ser igual a:

$$\alpha \nabla = I \tan \varphi \rightarrow \alpha = (I/\nabla) \tan \varphi$$



Igualmente se tendrá un momento con un brazo paralelo a la línea de centro del cuerpo flotante producto del cambio de volumen (aquí dimensionalmente no se aprecia ya que habría que multiplicar la expresión anterior por la densidad del fluido):

$$\left(\int \frac{1}{2} y^2 \tan \varphi \, dx \right) \frac{2}{3} y \tan \varphi = \frac{\tan^2 \varphi}{2} \int \frac{2}{3} y^3 \, dx = \frac{I \tan^2 \varphi}{2}$$

III. Hidrostática y Estabilidad

2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

Brazo adrizante (*righting arm*)

Lo cuál por equilibrio debe ser igual a:

$$\beta \nabla = \frac{I \tan^2 \varphi}{2} \rightarrow \beta = (I/2\nabla) \tan^2 \varphi$$

Consecuentemente:

$$B_0 R = (I/\nabla) \sin \varphi + (I/2\nabla) \tan^2 \varphi \sin \varphi$$

$$B_0 R = \sin \varphi [(I/\nabla) + (I/2\nabla) \tan^2 \varphi]$$

Observando la figura anterior se ve que:

$$GZ = B_0 R - B_0 G \sin \varphi$$

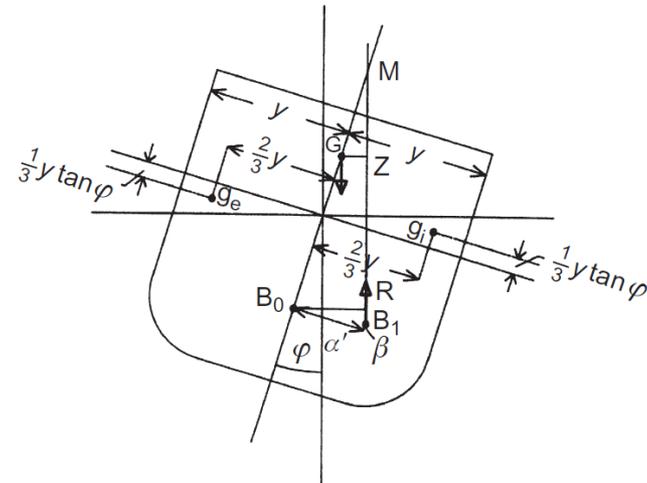
$$GZ = \sin \varphi [(I/\nabla) + (I/2\nabla) \tan^2 \varphi - B_0 G]$$

Recordando que $B_0 M = (I/\nabla)$, se tendrá que:

$$GZ = \sin \varphi [B_0 M + (I/2\nabla) \tan^2 \varphi - B_0 G]$$

$$GZ = \sin \varphi \left[GM + \frac{I}{2\nabla} \tan^2 \varphi \right]$$

La expresión es bastante exacta para $0^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$.



Cuando $\varphi \leq 4$, la expresión anterior se puede re escribir como

$$GZ = GM \sin \varphi$$

Aquí se ve claramente que cuando $GM < 0$, el brazo adrizante también será negativo.

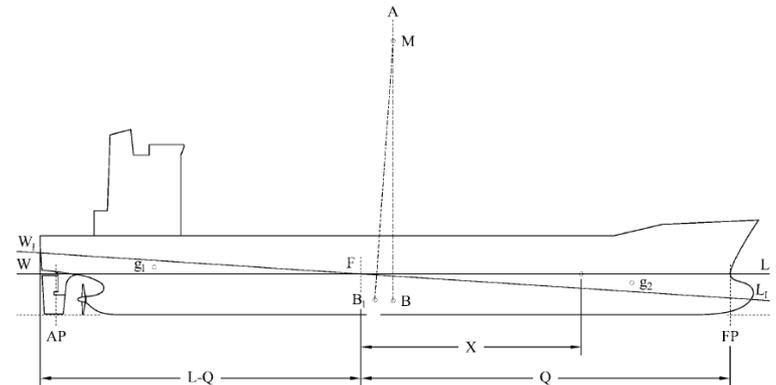
III. Hidrostática y Estabilidad

2. Altura metacéntrica y estabilidad a ángulos pequeños

Altura metacéntrica, localización del metacentro longitudinal, y estabilidad longitudinal

Los principios involucrados en la estabilidad longitudinal son los mismos involucrados en la estabilidad transversal, sólo que aquí la estabilidad depende de la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro longitudinal. Realmente para formas típicas de casco de buque es prácticamente imposible que el buque sea inestable cuando se inclina sobre un eje transversal sino se encuentra en estado en avería.

En todo caso si desea ver un análisis detallado del cálculo de la altura metacéntrica longitudinal puede referirse a la sección 3.4 del libro *The Principles of Naval Architecture Series: Intact Stability*, C.S. Moore, SNAME, 2010.

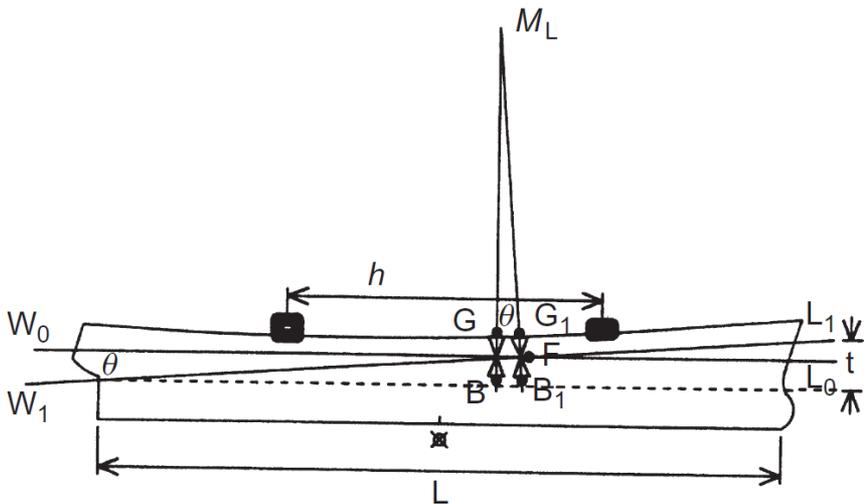


III. Hidrostática y Estabilidad

3. Curvas hidrostáticas

Es común obtener el desplazamiento y la posición del centro de flotabilidad y del metacentro, entre otras propiedades, para un rango de líneas de agua paralelas a la línea de agua de diseño y graficar estos valores contra el calado medido. A este conjunto de curvas se les conoce como curvas hidrostáticas.

Momento para cambiar el trim



Trim no es más que la diferencia de calado entre proa y popa producto de que el buque está aporado o aporado.

En la figura anterior al mover un peso w de su posición inicial, una distancia h hacia una nueva posición hacia proa se tendrá un momento de cabeceo (*trimming moment*) wh . Dicho momento causará que el centro de gravedad se mueva de G a G_1 y que el centro de flotación se mueva de B a B_1 , de manera tal que:

$$GG_1 = \frac{wh}{W}$$

Dónde W es el peso total del buque.

De la geometría observada en la figura anterior, también se tendrá:

$$\tan \theta = \frac{t}{L} = \frac{GG_1}{GM_L} = \frac{wh}{WGM_L}$$

Dónde: L es la eslora entre perpendiculares y GM_L es la altura del metacentro longitudinal.

III. Hidrostática y Estabilidad

3. Curvas hidrostáticas

Momento para cambiar el trim

Consecuentemente el momento de cabeceo wh será igual a

$$wh = \frac{WGM_L t}{L}$$

Y el momento para causar un cambio unitario de trim sería

$$wh = \frac{WGM_L}{L}$$

El momento para cambiar el trim (*momento to change trim*, MCT) es una manera conveniente de mostrar que tan fácil un buque puede cabecear. Debe hacerse la observación que se puede tener MCT por 1 m o bien MCT por 1 cm.

Toneladas por unidades de inmersión (incremento en el desplazamiento por unidad de incremento en el calado)

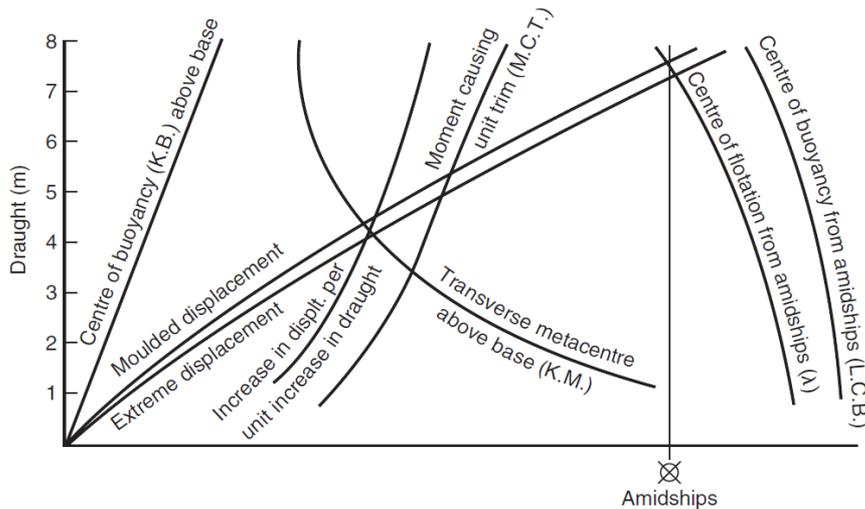
Sí un plano de línea de agua tiene un área A , entonces su incremento en el volumen desplazado por incremento unitario en el calado a ese plano de línea de agua es $1 \times A$, y el incremento en el desplazamiento será $\rho g A$. Para $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ y $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ el incremento en desplazamiento por incremento unitario en calado (estando este último en metros y el área del plano de líneas de agua en metros cuadrados) sería:

$$\left(1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \times (1 \text{ m}) \times (A \text{ m}^2) = 10.055A \text{ kN} = 1.025A \text{ t}_f$$

Al igual que con el MCT, es necesario saber la unidad de inmersión, esta puede ser 1 m o 1 cm. Cuando se trata de 1 cm se suele abreviar como TPC (*tonnes per centimeter of immersion*).

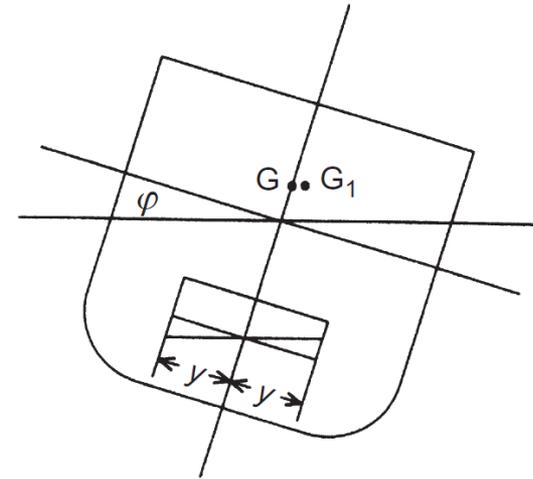
III. Hidrostática y Estabilidad

3. Curvas hidrostáticas



4. Superficies libres

Un buque en servicio usualmente tendrá tanques los cuáles están parcialmente llenos con líquidos. Estos pueden ser tanque de combustible, de agua potable, o de agua de lastre. Cuando el buque en servicio es escorado lentamente a un ángulo pequeño, el líquido se moverá. Aquí se considerará que existe una condición quasi estática y por lo tanto el líquido no impactará las paredes del tanque.



Para ángulos pequeños y suponiendo que la superficie líquida no intercepta el techo o el fondo del tanque, el volumen de líquido que se mueve, de acuerdo a la figura anterior, sería:

$$\int \frac{1}{2} y (y \tan \phi) dx, \text{ integrado sobre toda la eslora } l \text{ del tanque.}$$

Esto último asumiendo que la sección transversal del volumen que se mueve puede ser considerada triangular (esto implica que se tienen *wall side tanks*).

III. Hidrostática y Estabilidad

4. Superficies libres

Y el momento de volumen transferido estaría dado por:

$$\left(\int \frac{1}{2} y (y \tan \varphi) dx \right) \left(\frac{4}{3} y \right) = \tan \varphi \int \frac{2}{3} y^3 dx = I_1 \tan \varphi$$

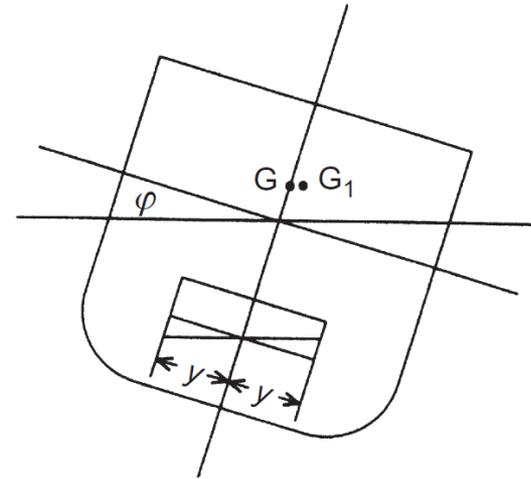
Donde I_1 representa el segundo momento de área (momento de inercia) del área paralela a la superficie del fluido en el tanque en torno a la línea de centro.

Consecuentemente el momento producto del peso de líquido transferido estaría dado por:

$$\rho_f g I_1 \tan \varphi$$

Donde ρ_f es la densidad del fluido y g la aceleración gravitatoria.

Del equilibrio, el momento producto del cambio de posición del centro de gravedad en el buque de G a G_1 será igual al momento producto del peso de líquido transferido:



$$W G G_1 = \rho_f g I_1 \tan \varphi \rightarrow G G_1 = \frac{\rho_f g I_1 \tan \varphi}{W}$$

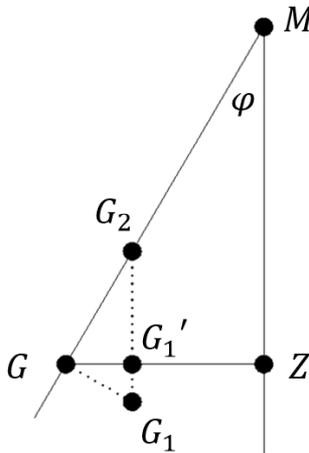
$$G G_1 = \frac{\rho_f g I_1 \tan \varphi}{\rho g \nabla} = \frac{\rho_f I_1 \tan \varphi}{\rho \nabla}$$

Donde W es el peso del buque, ρ la densidad del fluido en que esta flotante el buque, y ∇ el volumen de agua desplazado por el buque.

III. Hidrostática y Estabilidad

4. Superficies libres

El efecto del movimiento transversal provoca una reducción del brazo adrizante GZ producto de la cantidad GG_1' tal como se observa en la siguiente figura. Y esto último implica la reducción en la estabilidad. El cambio de G a G_1 es equivalente a mover a G a un punto G_2 sobre la línea de centro, de manera tal que $GG_1 = GG_2 \tan \varphi$



$$\cos \varphi = \frac{GG_1'}{GG_1} \rightarrow GG_1' = GG_1 \cos \varphi$$

Considerando que el brazo adrizante a ángulos pequeños se puede aproximar a $GM \sin \varphi$, entonces:

$$G_1'Z = G_2Z = GZ - GG_1'$$

$$G_2Z = GM \sin \varphi - GG_1 \cos \varphi$$

$$G_2Z = GM \sin \varphi - \left(\frac{\rho_f I_1 \tan \varphi}{\rho \nabla} \right) \cos \varphi = \sin \varphi \left(GM - \frac{\rho_f I_1}{\rho \nabla} \right)$$

Aquí evidentemente:

$$GG_2 = \frac{\rho_f I_1}{\rho \nabla}$$

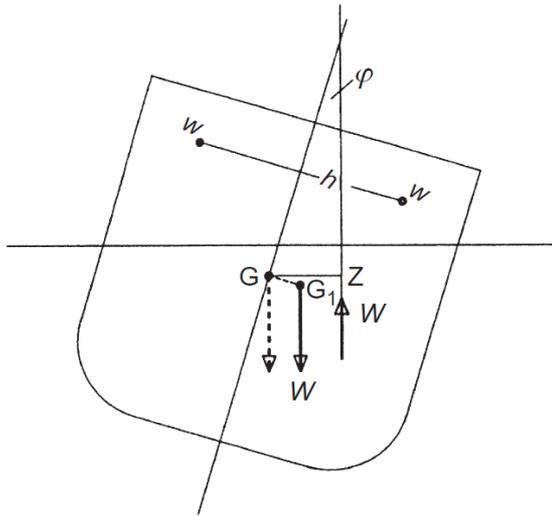
Y representaría el efecto de superficie libre que causa una disminución en la altura metacéntrica y una consecuente disminución del brazo adrizante.

Una manera bastante efectiva de disminuir el efecto de superficie libre es por medio de la división de los tanques.

III. Hidrostática y Estabilidad

5. Movimiento transversal de pesos

Sí un peso w se mueve transversalmente, de forma permanente, a través del buque a una cierta distancia h , por equilibrio puede encontrarse el cambio de posición del centro de gravedad $GG_1 = wh/W$, donde W es el peso total de la embarcación.



Considerando que este cambio involucra un escoramiento a ángulos pequeños, el brazo adrizante se verá disminuido de la siguiente forma:

$$G_2Z = GZ - GG_1'$$

$$G_2Z = GM \sin \varphi - GG_1 \cos \varphi$$

$$G_2Z = GM \sin \varphi - \left(\frac{wh}{W} \right) \cos \varphi$$

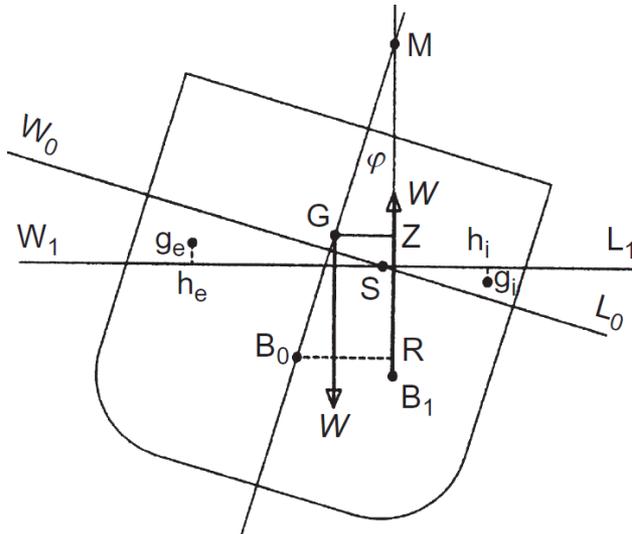
6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Formula de Atwood

Hasta este punto solo se ha considerado la estabilidad inicial, es decir la estabilidad a ángulos de escora bastante pequeños (no más de 4 u 5 grados). Cuando los ángulos ya no son pequeños, el metacentro ya no puede ser considerado como un punto fijo. En estos casos la altura metacéntrica no puede ser considerada como una medida apropiada para la estabilidad y se emplea el brazo adrizante como criterio.

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños



Asumiendo que el buque se encuentra en equilibrio bajo la acción del peso y la fuerza de flotabilidad, en general cuando este es inclinado un cierto ángulo φ que no es pequeño, la intersección de las líneas de aguas correspondientes a la parte que emerge y a la parte que inmerge, no se dará en la línea de centro sino en un punto arbitrario s .

En la imagen anterior el volumen representado por W_0SW_1 es el que emerge y es igual al volumen representado por L_0SL_1 que es el que se inmerge. Suponiendo que dichos volúmenes se denoten por v , el cambio horizontal del centro de flotación estaría dado por:

$$B_0R = \frac{(v)(h_e h_i)}{\nabla}$$

Donde: B_0R es la distancia horizontal entre el punto de aplicación original de la fuerza de flotabilidad y el punto R que se encuentra en la nueva línea de acción de la fuerza de flotabilidad, $h_e h_i$ la distancia horizontal del centroide del volumen que emerge al volumen que inmerge, y ∇ el volumen desplazado por el buque.

Y consecuentemente:

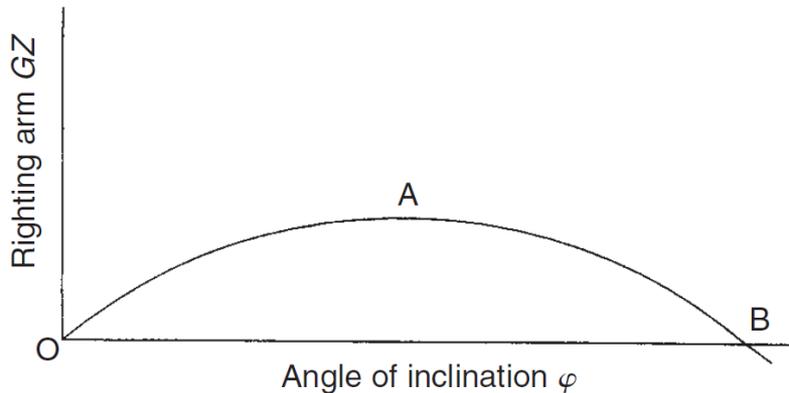
$$GZ = B_0R - B_0G \sin \varphi$$

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Curvas de estabilidad estática

Al evaluar v y $h_e h_i$ para un rango de valores de ángulos de escora, es posible graficar una curva de GZ vs φ . A dicha curva se le conoce como curva de estabilidad estática.



En el gráfico anterior se puede ver como GZ incrementa desde cero en su posición vertical hasta alcanzar un máximo en A , luego decrece y se vuelve cero nuevamente en B .

El buque zozobrará si el momento aplicado tiene un brazo mayor que el valor de GZ en A y se volverá inestable una vez se pase el punto B , el rango de OB se conoce como rango de estabilidad.

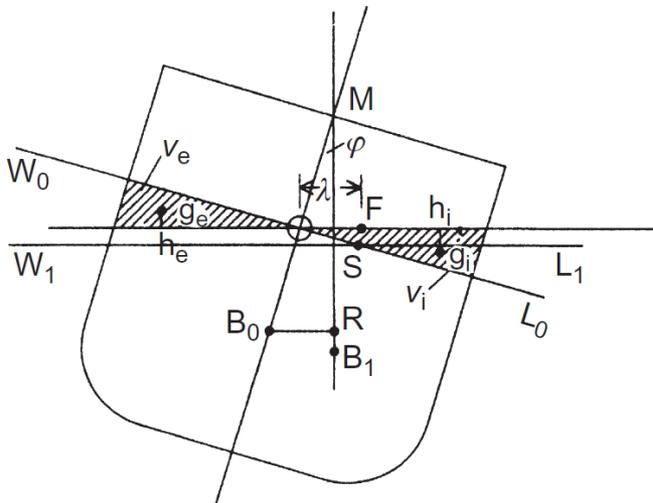
Ahora bien, en vista de que en general todos los buques no son *wall sided*, no es fácil determinar la posición de S para así encontrar la posición de los centroides del volumen de agua que emerge y que inmerge, el correspondiente valor de dicho volumen, y el consecuente valor de B_0R .

Un método empleado para realizar lo anterior, se basa en la siguiente figura.

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Curvas de estabilidad estática



Entonces:

$$B_0R = \frac{v_e(h_eO + \lambda) + v_i(h_iO - \lambda)}{\nabla} = \frac{v_e(h_eO) + v_i(h_iO) - \lambda(v_i - v_e)}{\nabla}$$

Donde el subíndice e se refiere al volumen emergido, y el subíndice i al volumen inmerso. λ simplemente es la distancia horizontal de la línea de centro (punto O) al punto F en que originalmente se encontraba S .

Y el brazo adrizante estaría dado por

$$GZ = \frac{v_e(h_eO) + v_i(h_iO) - \lambda(v_i - v_e)}{\nabla} - B_0G \sin \varphi$$

Ahora bien, con respecto a la curva de estabilidad estática, ha de recordarse que para ángulos bastante pequeños $GZ = GM \sin \varphi \cong GM\varphi$, y consecuentemente:

$$dGZ \Big|_{\varphi \rightarrow 0} = d(GM\varphi) = GMd\varphi$$

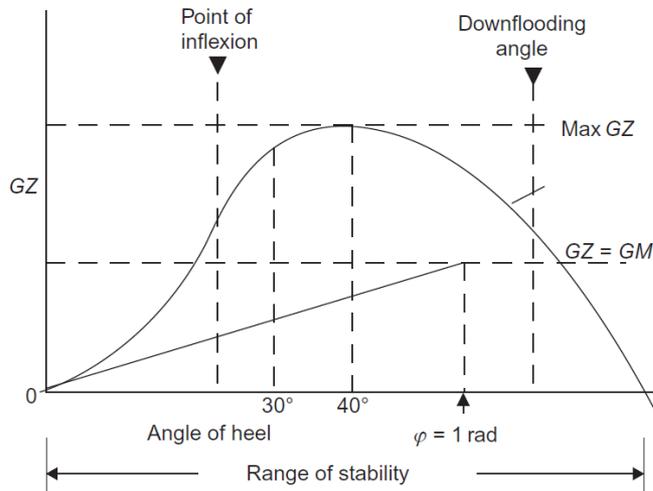
$$\frac{dGZ}{d\varphi} \Big|_{\varphi \rightarrow 0} = GM$$

Por lo tanto la pendiente del gráfico anterior en $\varphi = 0$ es igual a la altura metacéntrica. En el siguiente gráfico puede apreciarse mejor. Se suele marcar una ordenada en $\varphi = 1 \text{ rad}$, para determinar la pendiente en el origen, la cuál como se dijo será GM .

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Curvas de estabilidad estática



La ecuación derivada para el brazo adrizante cuando se tiene un *wall side ship* puede considerarse como un caso especial de la fórmula de Atwood.

$$GZ = \sin \varphi \left[GM + \frac{I}{2V} \tan^2 \varphi \right]$$

Y al recordar que:

$$B_0M = \frac{I}{V}$$

Se tiene:

$$GZ = \sin \varphi \left[GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi \right]$$

Angle of loll

Sí un buque tiene una altura metacéntrica positiva, este se encontrara en equilibrio cuando GZ sea igual a cero. Considerando que se trate de un *wall side ship*:

$$0 = \sin \varphi \left[GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi \right]$$

De donde se deduce que:

$\sin \varphi = 0 \rightarrow \varphi = 0$, el buque está en posición vertical sin escorarse.

$GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi = 0 \rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{2GM}{B_0M} \right)^{0.5}$, lo que implica que sí GM y B_0M son ambos positivos no existe solución, y por lo tanto la única posición de equilibrio sería la dada por $\varphi = 0$.

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Angle of loll

Sin embargo, sí la altura metacéntrica GM fuera negativa, se tendría dos soluciones adicionales para el ángulo de escora en el cuál se alcanza el equilibrio:

$$\varphi = \pm \tan^{-1} \left(\frac{2GM}{B_0M} \right)^{0.5}$$

Ante estos ángulos de escora se pueden presentar tanto brazos adrizantes positivos (lo que implica un momento restaurador) como brazos adrizantes negativos (lo que implica un momento de vuelco).

Altura metacéntrica en la condición de loll

Manteniendo la suposición de *wall side ship*, si φ_1 representa el ángulo de *loll*, entonces el valor de GM para pequeñas inclinaciones sobre sobre la posición de *loll* estaría dado por la pendiente de la curva de GZ sobre ese punto.

$$GZ = \sin \varphi \left[GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi \right]$$

$$\frac{dGZ}{d\varphi} = \cos \varphi \left[GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi \right] + \sin \varphi B_0M \tan \varphi \sec^2 \varphi$$

Recordando que en la condición de *loll*:

$$0 = \sin \varphi_1 \left[GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi_1 \right] \rightarrow$$

$$0 = \left[GM + \frac{B_0M}{2} \tan^2 \varphi_1 \right]$$

$$\left. \frac{dGZ}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_1} = \sin \varphi_1 B_0M \tan \varphi_1 \sec^2 \varphi_1 = \frac{B_0M \tan^2 \varphi_1}{\cos \varphi_1}$$

$$B_0M \tan^2 \varphi_1 = -2GM$$

$$\left. \frac{dGZ}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_1} = \frac{-2GM}{\cos \varphi_1}$$

$$\left. \frac{dGZ}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_1 \rightarrow 0} = \frac{-2GM}{\cos \varphi_1} \cong -2GM$$

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

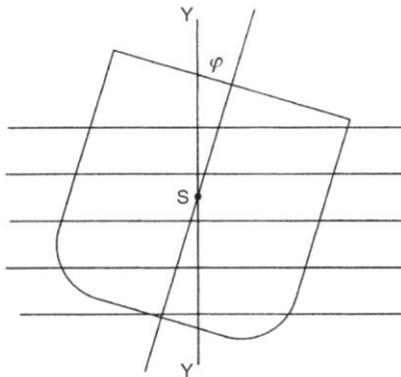
Altura metacéntrica en la condición de loll

Por lo tanto a menos que el ángulo de loll φ_1 no sea muy pequeño, la altura metacéntrica en esta posición será negativa y numéricamente el doble que en la posición de $\varphi = 0$.

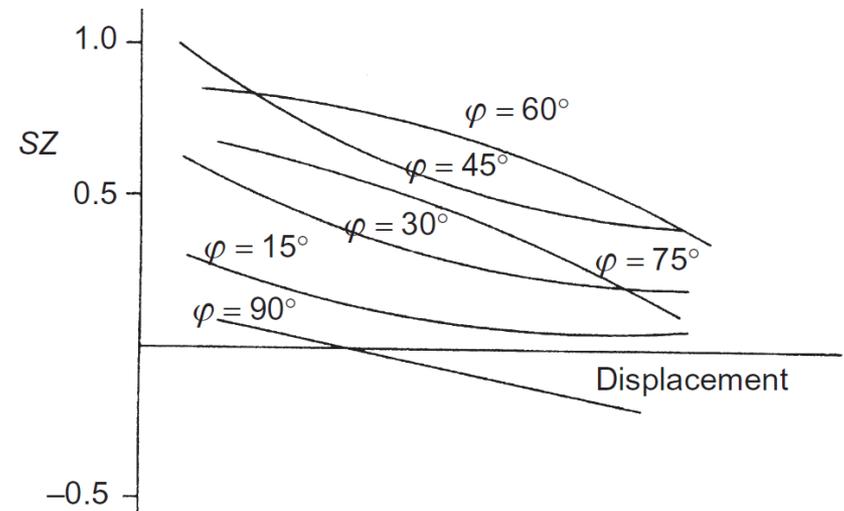
Curvas cruzadas de estabilidad

Estas curvas son dibujadas para superar la dificultad en definir líneas de agua de igual desplazamiento a varios ángulos de escora.

La siguiente figura muestra un buque inclinado a cierto ángulo φ sobre un punto arbitrario S que se encuentra sobre la línea de centro.



Tras calcular, para el rango de líneas de agua, los desplazamientos y las distancias perpendiculares SZ (distancia perpendicular a la línea YY que va de S hasta la línea de aplicación de la fuerza de flotabilidad para una línea de agua dada), se pueden dibujar las curvas cruzadas de estabilidad.



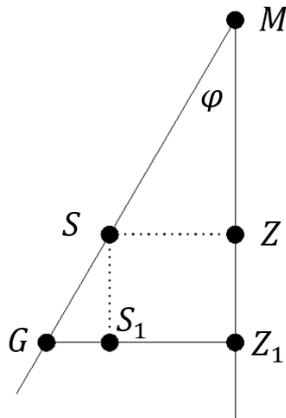
III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Derivación de las curvas de estabilidad estática a partir de las curvas cruzadas

Para cualquier desplazamiento deseado de un buque los valores de SZ pueden ser leídos de las curvas cruzadas. Sabiendo la posición del centro de gravedad para una condición de carga en particular permite obtener GZ_1 a partir de SZ al adherir o sustraer el término $SG \sin \varphi$ cuando G está debajo o encima de S , respectivamente.

Por ejemplo, si G se encuentra debajo:



$$GZ_1 = SZ + S_1G = SZ + SG \sin \varphi$$

Propiedades de las curvas estáticas de estabilidad

Hay un número de propiedades de las curvas GZ que son útiles a la hora de describir la estabilidad de un buque:

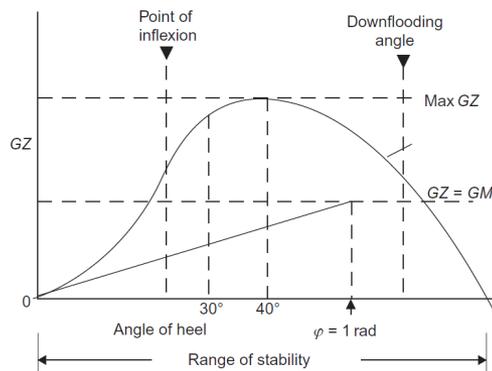
- La pendiente de la curva GZ en el origen es una medida de la estabilidad inicial GM .
- La ordenada máxima de la curva multiplicada por el desplazamiento (peso del buque) da el momento de escoramiento más grande que puede soportar la embarcación sin zozobrar.
- El ángulo en el cual GZ se vuelve cero es el ángulo más grande desde el cual el buque puede regresar una vez el momento perturbador es removido (*angle of vanishing stability, angle of loll*).

III. Hidrostática y Estabilidad

6. Estabilidad a ángulos no pequeños

Propiedades de las curvas estáticas de estabilidad

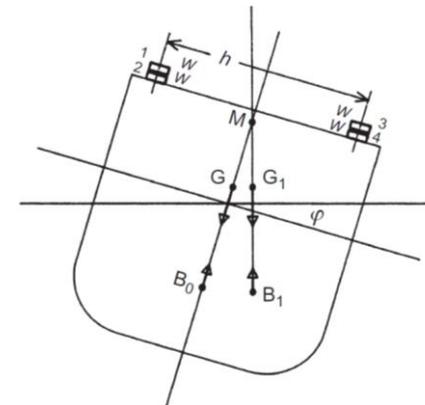
- El rango de ángulos sobre el cuál GZ es positivo es llamado rango de estabilidad.
- Los valores de GZ a 30° y a 40° ayudan a definir la curva y están involucrados en ciertos criterios de estabilidad dados por IMO.
- Abra un ángulo, usualmente inferior al *angle of vanishing stability*, en donde cantidades significativas de agua pueden introducirse a la embarcación a través de las aperturas en la superestructura. A este ángulo se le conoce como *downflooding angle*.



7. El experimento de inclinación

El experimento de inclinación, involucra causar el escoramiento del buque a ángulos pequeños, moviendo masas de pesos conocidos a distancias transversales conocidas a través de la cubierta, y observando cuál es el ángulo de inclinación correspondiente. Idealmente el experimento es conducido cuando el buque está completo, pero esto generalmente no es posible (siempre existen pesos que son removidos o adheridos después de realizar el experimentos).

Un arreglo típico para el experimento es mostrado en la siguiente figura.



III. Hidrostática y Estabilidad

7. El experimento de inclinación

Dos conjuntos de dos masas, cada una de peso w , son colocadas a cada lado del buque en *amidships*, a una distancia h que va de babor a estribor.

Entonces, la masa 1 por ejemplo, se mueve hacia donde está la masa 3 y la 4; lo que causa que el centro de gravedad del buque se mueva de G a G_1 a medida que el buque se inclina a un ángulo pequeño el centro de flotabilidad se mueve de B a B_1 :

$$GG_1 = \frac{wh}{W} = GM \tan \varphi \rightarrow GM = \frac{wh}{W \tan \varphi}$$

Aquí el ángulo de escora φ puede ser obtenido al usar péndulos largos (generalmente de 4 a 6 m de largo, y dispuestos en 2 o 3 posiciones diferentes), suspendidos desde las cubiertas hasta las bodegas. Sí d y l denotan la distancia recorrida por el péndulo y la longitud de la cuerda del péndulo, de forma respectiva, entonces $\varphi = \tan^{-1}(d/l)$.

Una vez se obtiene la altura metacéntrica, y a partir del valor de KM obtenido a partir de hidrostática para el calado promedio (calado medio entre el calado en la perpendicular de proa y el calado en la perpendicular de popa, o bien el calado en *amidships*) y para la densidad del agua en donde se encuentra flotando el buque, $KM = KB_0 + B_0M$, se determina la posición del centro de masa, $KG = KM - GM$.

Para obtener mejores resultados se deben seguir ciertas recomendaciones:

- El experimento se debe repetir para diferentes cambios de posición de las masas de pesos conocidos.
- El experimento se debe conducir en agua tranquila y con poco viento.
- El buque debe flotar libremente.

III. Hidrostática y Estabilidad

7. El experimento de inclinación

- Todos los pesos deben estar asegurados (cosa que no se muevan durante el experimento) y los tranques deben estar totalmente llenos o totalmente vacíos para evitar el efectos de superficie libre.
- El número de personas a bordo se debe mantener en un mínimo, y deben estar en posiciones definidas al momento de realizar las lecturas.
- El péndulo debe estar sumergido en un fluido viscoso, de forma tal que sea amortiguado el movimiento.
- La densidad del agua debe ser tomadas en diferentes posiciones y a diferentes profundidades por un hidrómetro para estimar correctamente la densidad promedio del agua.
- Los calados en popa, proa, y *amidships* deben ser registrados.
- El ángulo de inclinación no debe superar los 4°.

Ha de decirse que por norma de la IMO, todo buque de pasajeros con independencia de su tamaño, y cualquier embarcación de carga de 24 m o más de eslora debe ser sometida al experimento de inclinación a una vez es completada su construcción.

8. Inundación y estabilidad en estado de avería (breve descripción)



III. Hidrostática y Estabilidad

8. Inundación y estabilidad en estado de avería (breve descripción)

En el evento de colisión, encallamiento, o algún otro evento que conlleve a la pérdida de estanqueidad en el casco, lo que sucederá es que el agua entrará en la embarcación. Y si dicha inundación no se restringe eventualmente el buque se hundirá por completo o zozobrará.

Típicamente para reducir la probabilidad de que el buque se hunda o zozobre en estado de avería, la embarcación se suele dividir en una serie de compartimientos estanco por medio de mamparos. Los buques de pasajeros son los que presentan el mayor número de subdivisiones.

Los tres escenarios de avería son los siguientes:

- La fuerza de empuje resultante del buque es inadecuada para soportar su peso y este se hunde (*it founders*).
- La estabilidad transversal es inadecuada y el buque zozobra (*it capsizes*).

- La estabilidad longitudinal es inadecuada y el buque se hunde tras estar apopado o aporado (*it plunges*).

9. Regulaciones

El criterio mandatorio mínimo, con respecto a la estabilidad en estado de no avería, para todo tipo de embarcación de acuerdo con la IMO se basa en ciertas propiedades de la curva GZ :

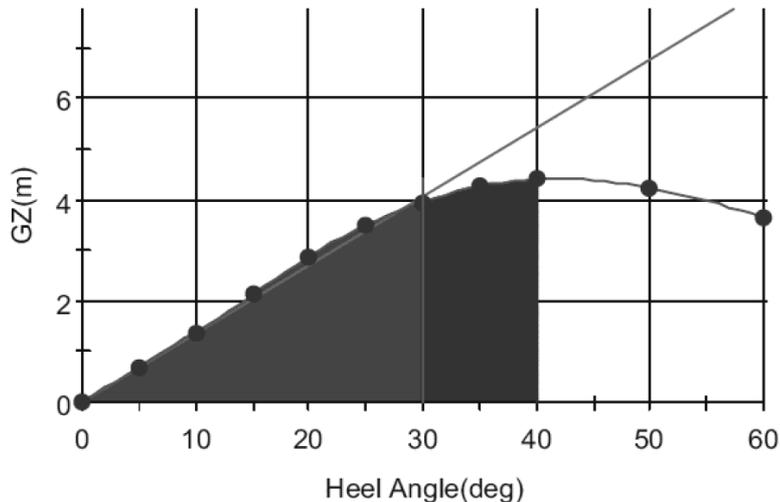
- El área bajo la curva GZ no debe ser inferior a los 0.055 m-radian al llegar a un ángulo de escora de 30° , ni menos de 0.09 m-radian al llegar a un ángulo de escora de 40° o al llegar al *downflooding angle* (si este es inferior a los 40°), y no debe ser inferior a los 0.03 m-radian entre estos dos ángulos (30° y 40°).
- GZ debe ser al menos 0.20 m a un ángulo de escora igual o mayor que 30° .

III. Hidrostática y Estabilidad

9. Regulaciones

-El valor máximo de GZ debe ocurrir a un ángulo no inferior a los 25° .

-La altura metacéntrica no debe ser inferior a los 0.15 m.



Adicionalmente existen otros requerimientos especiales para ciertos tipos de buques (tanqueros, graneleros, y buques de pasajeros, por ejemplo).

10. Métodos para mejorar la estabilidad

Algunos métodos para mejorar la estabilidad son los siguientes:

- Cambios en la forma geométrica del casco. En las etapas tempranas del diseño, variaciones en la forma del casco, usualmente cambios en manga o puntal, pueden ser usados de forma efectiva para obtener una estabilidad óptima.
- Ajuste de carga. La carga puede ser ajustada de forma tal que se mejora la estabilidad, al corregir el *trim* y al minimizar el escalamiento. Ha de decirse que los ajustes que se puedan hacer en el tipo de carga y en las posiciones donde se pueda almacenar dicha carga; va a depender del tipo de embarcación.

III. Hidrostática y Estabilidad

10. Métodos para mejorar la estabilidad

- Lastre permanente. El lastre permanente, localizado de forma apropiada, puede ser usado con frecuencia para mejorar la estabilidad transversal y el *trim*.
- Remoción de pesos. La remoción de peso por encima de la línea de flotación y hacia los costados es una de las formas más efectivas de mejorar la estabilidad ya que disminuye la posición del centro de gravedad con respecto al plano de línea base.
- Instrucciones de carga. Los estudios de estabilidad y de *trim* durante la fase de diseño indican los límites con respecto a la carga que se puede colocar en el buque para que se obtengan características satisfactorias. Estas instrucciones deben ser respetadas.