



CAPÍTULO 4 – ESTABILIDAD

(Traducción Libre AGC 2021) (ENGINEERING", 2021)

Contenido

4	OBJETIVOS DEL CAPÍTULO.....	2
4.1	Introducción.....	3
4.2	El momento de adrizamiento interno producido por un buque escorado.....	3
4.3	La Curva de Estabilidad Estática Intacta.....	6
4.4	Características que se obtienen de la Curva de Estabilidad Estática Intacta.....	11
4.5	Características que se obtienen de la Curva de Estabilidad Estática Intacta.....	13
4.6	Efectos de un cambio transversal del centro de gravedad en el brazo de adrizamiento (GZ) de un buque: corrección de coseno.....	18
4.7	Estabilidad Dañada.....	25
4.8	Corrección de Superficie libre a pequeños ángulos de escora.....	30
4.9	Altura Metacéntrica y las Curvas de Estabilidad Intacta.....	40
1.	<i>Heel:</i>	43
2.	<i>List:</i>	43
3.	<i>Loll:</i>	44
	PROBLEMAS – CAPÍTULO 4.....	47
	Sección 4.2 El Brazo de adrizamiento:.....	47
	Sección 4.3 La Curva de Estabilidad Estática Intacta:.....	47
	Sección 4.4 Características de Estabilidad General:.....	48
	Sección 4.5 Corrección por Seno:.....	49
	Sección 4.6 Corrección por Coseno:.....	51
	Sección 4.7 Estabilidad Dañada:.....	52
	Sección 4.7 Estabilidad Dañada:.....	57
	Sección 4.9 Altura metacéntrica:.....	58



4 OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

1. Explicar los conceptos de brazo adrizamiento y momento de adrizamiento y muestre estos conceptos en un diagrama vectorial en una sección del casco de un buque que está siendo inclinado por un esfuerzo externo.
2. Calcular el momento de adrizamiento de un buque conocida la magnitud del brazo de adrizamiento.
3. Leer, interpretar y bosquejar una Curva de Estabilidad Estática Intacta (o Curva del brazo de adrizamiento) y dibujar el diagrama vectorial de fuerzas para cualquier punto a lo largo de la curva.
4. Definir qué significa la buque suave o buque brusco respecto de la estabilidad.
5. Evaluar la estabilidad de un buque en términos de:
 - a) Rango de estabilidad
 - b) Estabilidad dinámica
 - c) Brazo de adrizamiento máximo
 - d) Momento máximo de adrizamiento
 - e) Ángulo en el que se produce el momento máximo de adrizamiento
6. Crear una curva de estabilidad estática intacta para un buque de desplazamiento dado y con un centro de gravedad vertical asumido, utilizando las curvas de estabilidad cruzadas.
7. Corregir una curva GZ para un cambio vertical del centro de gravedad del buque e interpretar la curva resultante. Dibujar el diagrama vectorial apropiado para una sección y usar este diagrama para mostrar la derivación de la corrección cosenoidal.
8. Corregir una curva GZ para un cambio del centro de gravedad transversal de la nave e interpretar la curva. Dibujar el diagrama vectorial de la sección apropiada y usar este diagrama para mostrar la derivación de la corrección del coseno.
9. Determinar la pendiente inicial de la curva GZ usando Altura Metacéntrica.
10. Analizar y demostrar el daño en buques, incluyendo:
 - a) Uso del método de peso agregado para calcular el asiento de la nave, el ángulo de la escora y el calado
 - b) Describir cualitativamente el método de flotabilidad perdida
 - c) Criterios de Estabilidad dañada para buques
11. Analizar y demostrar los efectos de superficie libre, incluyendo:
 - a) Consecuencias de la superficie libre en la estabilidad general del buque
 - b) Formas de delimitar los efectos de la superficie libre.
 - c) Calcular la altura metacéntrica efectiva.
 - d) El significado de una altura metacéntrica negativa y mostrar esta condición en un diagrama vectorial en una sección del casco.
 - e) Corregir la curva GZ.



4.1 Introducción

En el último capítulo se analizó la hidrostática de un buque con casco de desplazamiento. En dicha oportunidad solo se estudiaron dos fuerzas generadas internamente y no se consideraron las fuerzas externas. La Fuerza de Boyantez resultante y el Peso resultante de la nave estaban alineados verticalmente para que no se generaran momentos. Los criterios para el equilibrio estático se cumplían para que el casco de desplazamiento permaneciera inmóvil hasta que fuerzas externas actuaran sobre el buque o se generara un cambio de peso.

En este capítulo, nos preocuparemos de la capacidad del buque para permanecer adrizado cuando fuerzas externas intentan inclinarla. En general nos preocupa el movimiento transversal o de escora, ya que es casi imposible inclinar longitudinalmente un buque de extremo a extremo. En este capítulo, el peso resultante del buque no estará siempre alineado verticalmente con la fuerza de boyantez resultante, por lo que se producirán momentos internos.

- Primero, se analizará el principio general de un momento de adrizamiento para un buque y verificar cómo la magnitud del momento de adrizamiento es una función del ángulo de inclinación.
- Segundo, se mostrará cómo el momento de adrizamiento se ve afectado por cambios de la ubicación vertical y transversal del centro de gravedad del buque.
- Tercero, se analizará el efecto de la estabilidad dañada por rotura del casco y se verá como modelar su efecto en un buque con casco dañado.
- Cuarto, se estudiarán los efectos de la superficie libre (fluidos en estanques o compartimientos llenos parcialmente) en el momento de adrizamiento.
- Finalmente, se analizará los efectos de una altura metacéntrica negativa en la estabilidad del buque.

4.2 Momento de adrizamiento interno generado por un buque escorado

Entender la estabilidad general se reduce a comprender cómo cambian las posiciones relativas del peso resultante del buque y la fuerza de boyantez resultante cuando un buque es inclinado por un momento externo o cupla.

4.2.1 Cupla o Par de Fuerzas externas

Un momento escorante externo puede ser causado por la acción del viento que empuja el costado del buque, tratando de trasladarlo hacia de costado en la dirección en que sopla, y la fuerza del agua que se opone a esa traslación actuando en la dirección opuesta. Las fuerzas resultantes de estas dos fuerzas distribuidas actuarían paralelamente a la superficie del agua. La fuerza del viento resultante actuaría por encima del agua y la fuerza del agua resultante estaría por debajo de la superficie. Por lo tanto, las dos fuerzas resultantes no estarían alineadas, formarían un par o un momento externo provocando que el buque se escore. Vea la Figura 4.1.



4.2.2 La Cupla o el Par de Fuerzas internas

Un buque también tenderá a rotar cuando actúa sobre el viento y el agua; sin embargo, a medida que la nave se inclina debido a un momento externo, también desarrolla un momento interno. El momento interno actúa en respuesta al momento externo y en la dirección de rotación opuesta. Si los momentos internos y externos se equilibran, la nave permanecerá escorada en ese ángulo de inclinación, de lo contrario, seguirá inclinándose hasta que la nave se voltee.

Para entender cómo la nave desarrolla un momento interno, considere cómo las posiciones relativas del peso resultante (desplazamiento) de la nave y la fuerza de boyantez resultante cambian a medida que la nave se escora.

El peso resultante de la nave actúa verticalmente hacia abajo en el centro de gravedad. Solo los cambios en la distribución del peso afectan la ubicación del centro de gravedad. Si no se producen cambios de peso, no se producirán cambios en el centro de gravedad.

La fuerza de boyantez resultante actúa verticalmente hacia arriba en el Centro de la Boyantez. El centro de boyantez se encuentra en el centro del volumen sumergido del casco. Cuando la nave se inclina por un momento externo, la obra viva cambia de forma y por lo tanto, el centroide se desplaza al centro de la nueva forma de la obra viva. El movimiento del centro de boyantez respecto del centro de gravedad define las características de estabilidad de la nave a medida que esta se inclina.

La Figura 4.1 muestra una vista de la sección de un buque que está escorándose por un momento externo. Muestra las posiciones relativas del centro de gravedad y el centro de boyantez para un buque diseñado correctamente. La distancia perpendicular entre las líneas de acción del peso resultante y la fuerza de boyantez resultante se conoce como el "brazo de adrizamiento" (GZ).

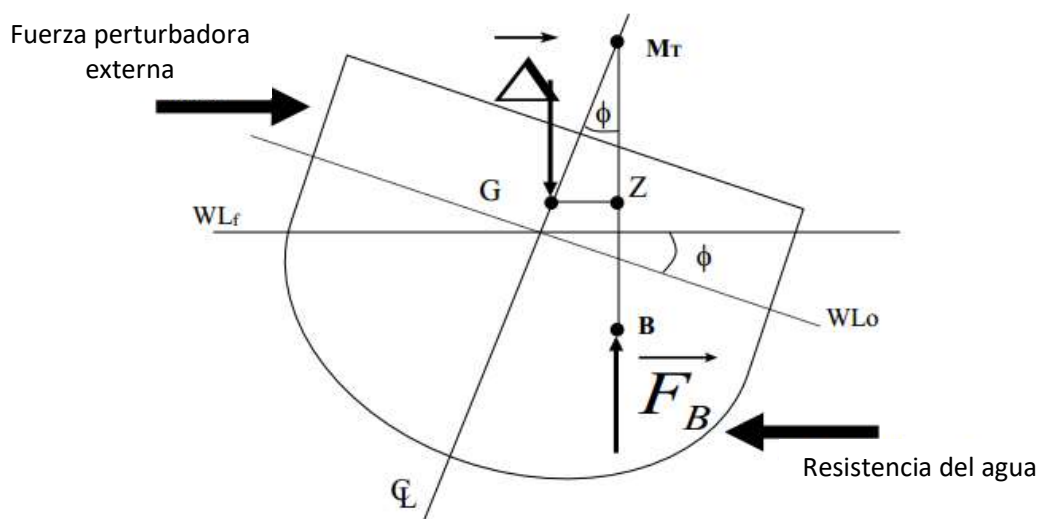


Figura 4.1 Buque escorado por un par externo



Ud. debiese estar capacitado para dibujar el esquema de la figura 4.1 sin ayuda de sus apuntes.

Para encontrar el momento de adrizamiento interno, multiplique el brazo de adrizamiento por la magnitud del peso resultante de la nave (o la magnitud de la fuerza de boyantez resultante, ya que la magnitud de estas fuerzas es igual). La siguiente ecuación muestra esta relación.

$$RM = \overline{GZ} \times \Delta = \overline{GZ} \times F_B$$

Donde: **RM** es el brazo de adrizamiento del buque (T-m ó LT-ft)

Δ es el desplazamiento del buque (T ó LT)

F_B es la resultante de la fuerza de Boyantés (T ó LT)

GZ es el brazo de adrizamiento (m o ft). Es la distancia perpendicular entre las líneas de acción de resultante de la fuerza de boyantez y la resultante del peso del buque. Esta distancia es función del ángulo de escora.



4.3 La Curva de Estabilidad Estática Intacta

La figura 4.1 es una instantánea de la imagen de la estabilidad total. Estamos interesados en ver cómo la Figura 4.1 cambia a medida que la nave se escora desde los cero grados hasta ángulos suficientemente grandes para que la nave se vuelva de campana. Para ayudarnos a conceptualizar este proceso, se construirá un gráfico de ángulos de inclinación (ϕ) versus los brazos de adrizamiento (GZ). Este gráfico se denomina "Curva de Estabilidad Estática Intacta" o "Curva de Brazo de Adrizamiento".

La curva de estabilidad estática intacta asume que el buque está inclinado casi-estáticamente en aguas tranquilas. Inclinado casi-estáticamente significa que el momento externo que hace inclinarse transversalmente al buque lo está haciendo en pasos infinitamente pequeños para que el equilibrio esté siempre presente. En la práctica esto es imposible, pero es una idealización aceptable en el modelamiento de la estabilidad de un buque. Es necesario darse cuenta de que las predicciones hechas mediante la curva de estabilidad estática intacta no se pueden aplicar directamente a un buque que se escora dinámicamente cuando se encuentra en una vía marítima. La dinámica de dicho sistema, incluida la aplicación adicional de fuerzas externas y la presencia de un momento de rotación, no están consideradas en la curva de estabilidad estática intacta; sin embargo, dicha curva de estabilidad es útil para fines comparativos. Se pueden comparar las características de estabilidad de las diferentes formas del casco, así como las distintas condiciones de operación para un mismo tipo de casco.

La figura 4.2 muestra una curva típica de una condición de estabilidad estática intacta. Cuando la nave está en equilibrio sin fuerzas externas que actúen sobre ella, el peso resultante del buque se alinea verticalmente con la fuerza de boyantez resultante. Como un momento externo escora al buque a babor o estribor, el peso resultante y la fuerza de boyantez resultante ya no estarán alineados verticalmente, creando el brazo de adrizamiento. A medida que aumenta la escora, el brazo de adrizamiento también aumentará hasta alcanzar un valor máximo y luego disminuirá hasta que el peso resultante del buque y la fuerza de boyantez resultante estén nuevamente verticalmente alineados. Si se sigue escorando, la nave se volcará. Ver Figura 4.3.

Ud. Debería poder dibujar la Figura 4.2 y el diagrama vectorial de fuerzas que corresponde a cualquier punto de la curva de la Figura 4.2. (tal como se muestra en la Figura 4.3,) sin usar sus apuntes.

Normalmente en las curvas se muestra solo el lado de estribor de la curva de estabilidad intacta. La curva completa se muestra en la Figura 4.2 para dar la imagen completa de la curva de estabilidad estática. Observe cómo se dibuja el lado de babor en el cuadrante 3, ya que a los ángulos y los brazos de adrizamiento de babor se les asigna un valor negativo por convención para diferenciarlos de los ángulos y brazos de adrizamiento de estribor.

Cada curva de estabilidad intacta está construida para un desplazamiento y un centro de gravedad vertical específico. El proceso para obtener la curva de estabilidad intacta real se realiza mediante la lectura de valores de las "curvas cruzadas de estabilidad" utilizando un desplazamiento dado del buque, y luego se realiza una corrección sinusoidal para corregir la ubicación vertical correcta del centro de gravedad del buque analizado. Aprenderá sobre esta corrección por seno más adelante en este capítulo.



Forma general de la Curva de estabilidad estadística intacta

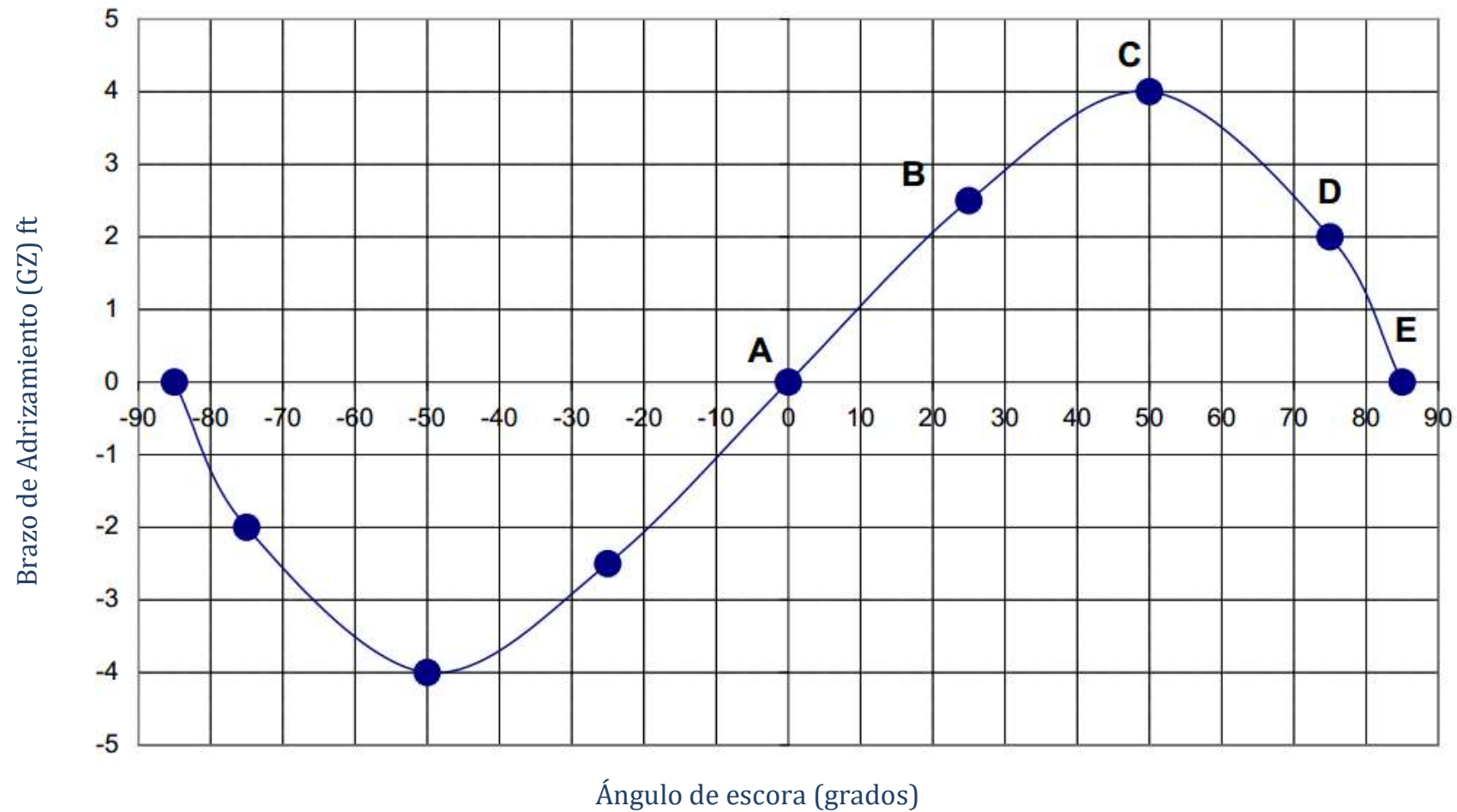


Figura 4.2 Curva de Estabilidad Estática Intacta.

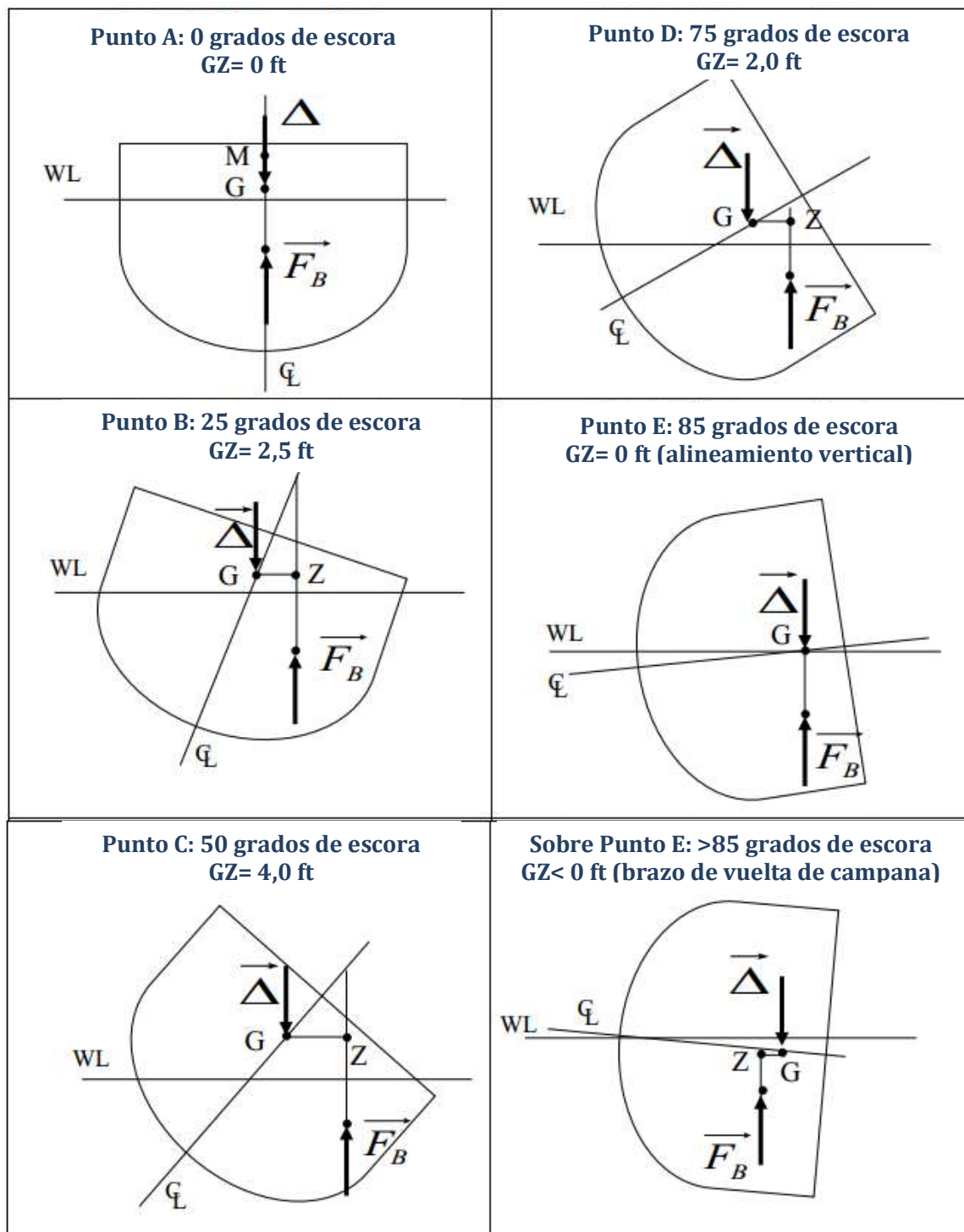


Figura 4.3 Dibujos vectoriales asociados con la figura 4.2



4.3.1 Curvas Cruzadas de Estabilidad

Las curvas cruzadas de estabilidad son una serie de curvas en un conjunto de ejes. El eje X representa al desplazamiento del buque en unidades de peso o masa. El eje Y representa el brazo de adrizamiento del buque en unidades de distancia. Cada curva es para un ángulo de escora. Normalmente se registran ángulos de escora a cada 5 o 10 grados. La figura 4.4 muestra un conjunto de curvas cruzadas para una fragata tipo Adelaide o un FFG-7. A medida que resulte necesario, se entregarán las curvas cruzadas para otros buques que se analizará durante este capítulo.

La serie completa de curvas asume una ubicación arbitraria del centro de gravedad vertical del buque. En algunas ocasiones se asume que la ubicación del centro de gravedad está en la quilla, lo que puede parecerle extraño al principio, pero tiene sentido cuando considera que la ubicación real del centro de gravedad del buque siempre estará sobre la quilla. Esto significa que la corrección sinusoidal siempre se restará del valor obtenido de las curvas cruzadas. De lo contrario, la corrección del seno en ocasiones tendría que ser restada y en otras sumada. La posición del centro de gravedad con el que se trazaron las curvas de un buque siempre se indicará en las curvas cruzadas.

Las curvas cruzadas están formadas por una serie de integraciones basadas en la geometría del casco. Algo de esto se mencionó en el Capítulo 2. Está fuera del alcance de este curso explicar detalladamente cómo se derivan estas curvas cruzadas de la geometría básica del casco.

En resumen, la curva de estabilidad estática intacta, para un único desplazamiento, se obtiene de los valores de las curvas de estabilidad cruzadas y el uso de una corrección sinusoidal para obtener la ubicación real del centro de gravedad vertical.

Ejercicio para el alumno: En una hoja de papel, dibuje una curva de estabilidad estática intacta para una FFG-7 que desplaza 4000 LT. Supongamos que el FFG-7 tiene un $KG = 0$, por lo que no es necesaria una corrección sinusoidal.

Esto puede parecer que no es realista, pero ayuda a comprender y ejercitar la obtención de valores de las curvas cruzadas para construir la curva de estabilidad intacta. Como se mencionó al final de la página 6/68, más adelante se verá cómo realizar la corrección por seno obtener la posición real del centro de gravedad vertical del buque.

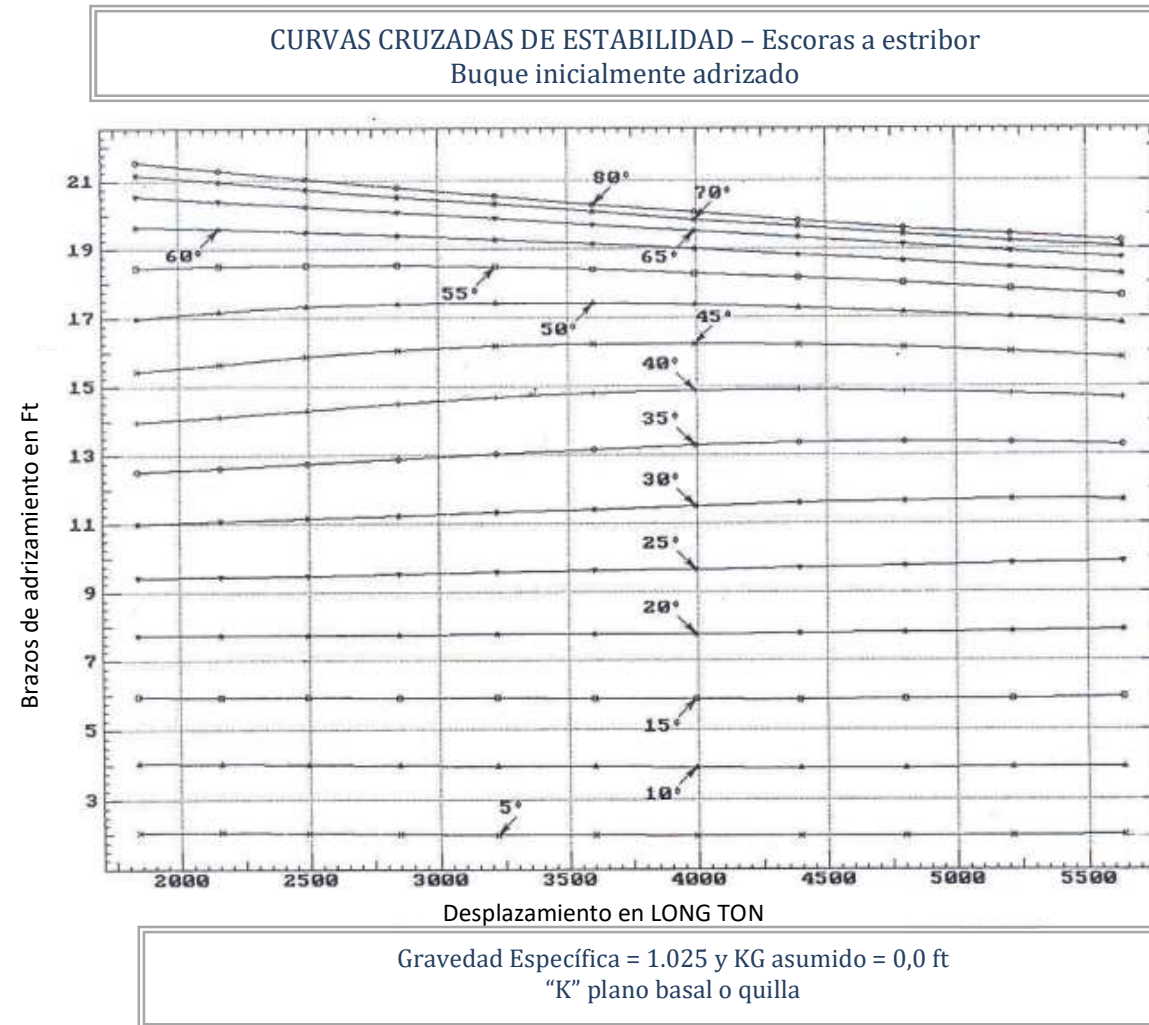


Figura 4.4 Curvas cruzadas de estabilidad para una FFG-7



4.4 Características que se obtienen de la Curva de Estabilidad Estática Intacta

Se pueden obtener varias características de estabilidad general a partir de la curva de estabilidad intacta. LA figura 4.5 muestra una imagen simplificada del diagrama de la curva de GZ

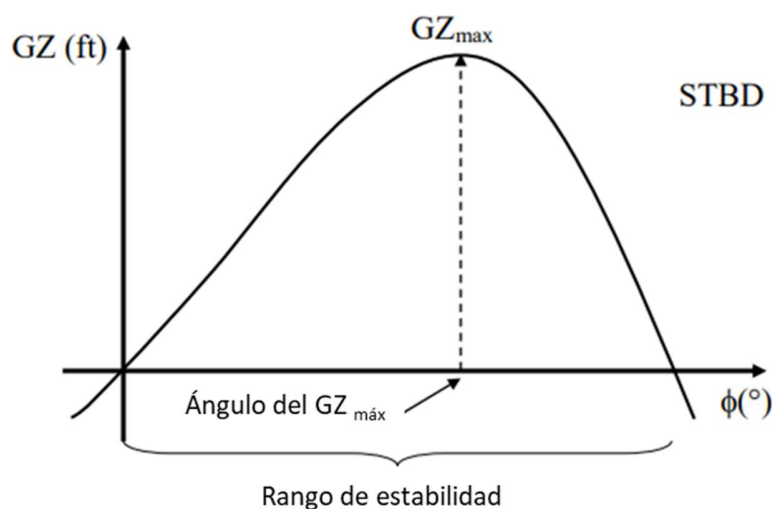


Figura 4.5 Vista simplificada de la curva de estabilidad estática intacta que representa características de estabilidad específicas

4.4.1 Rango de estabilidad

Este es el rango de ángulos para los que existe un momento de adrizamiento. El rango comienza en el ángulo que corresponde a la posición de equilibrio inicial del buque cuando aún no se le aplican momentos externos y va hasta el ángulo en que el buque se dará vuelta de campana. Para un buque sin un ángulo de escora inicial, el ángulo de inicial será de cero grados. Si el buque tiene un ángulo de escora permanente, entonces el rango se da desde ese ángulo de escora hasta el ángulo en que se vuelca en dirección a la banda que se inclina.

En la Figura 4.2, el rango de estabilidad es:

0 - 85 grados para las escoras a estribor

0 - 85 grados para las escoras a babor

Cuanto mayor sea el rango de estabilidad, menor será la probabilidad de que el buque se de vuelta de campana. Si es inclinado hacia un ángulo cualquiera dentro del rango de estabilidad, la nave experimentará un momento de adrizamiento interno que lo adrizará cuando el momento externo desaparezca.



4.4.2 Máximo Brazo de Adrizamiento (GZ máx)

Este corresponde al brazo de adrizamiento que crea el momento interno más grande generado por el desalineamiento vertical de la fuerza de boyantez y la resultante del peso o desplazamiento. Simplemente se mide en la cresta de la curva de estabilidad estática intacta.

En la figura 4.2, el brazo de adrizamiento máximo es 4.1 pies.

4.4.3 Momento de Adrizamiento Máximo

Corresponde al momento estático mayor que puede producir el buque. Simplemente se calcula a partir del producto del desplazamiento del buque (Δ_s) por el brazo de adrizamiento máximo ($GZ_{\max}$). Las unidades de momento son (Fuerza por distancia; Ton-m o en este caso LT-ft)

Cuanto mayor sea el valor del momento de adrizamiento máximo, menor será la probabilidad de que el buque vuelque. El momento máximo de adrizamiento no se puede mostrar directamente en la curva de estabilidad estática intacta. Solo se puede mostrar el brazo de adrizamiento máximo. Sin embargo, solo hay una diferencia de escala entre el brazo de adrizamiento y el momento de adrizamiento.

4.4.4 Ángulo del GZ máx

Este es el ángulo de escora en el que se produce el momento de adrizamiento máximo. Más allá de este ángulo, el momento de adrizamiento se reducirá hasta llegar a cero.

En la figura 4.2 el ángulo de $GZ_{\max}$ es de 50 grados

Es deseable que este ángulo se produzca en grandes grados de escora para que un buque que se esté balanceando experimente un momento de adrizamiento que aumente en magnitud sobre un rango mayor de ángulos de escora.

4.4.5 Estabilidad Dinámica:

Este es el trabajo que realiza casi de forma estática (muy lentamente) haciendo escorar a la nave a través de su rango de estabilidad hasta el ángulo de volcamiento. Matemáticamente, este trabajo se representa por la expresión:

$$\Delta_s \int GZ d\phi$$

Este es el producto del desplazamiento del buque con el área bajo la curva de estabilidad estática intacta. Las unidades son LT-ft. La estabilidad dinámica no se puede mostrar en la curva de estabilidad estadística intacta, pero si se puede mostrar el área debajo de la curva.

El trabajo representado por la estabilidad dinámica no es necesariamente representativo del trabajo necesario para volcar a un buque en condiciones reales. Esto se debe a que esta curva no toma en cuenta el momento de rotación u otras fuerzas que puedan estar presentes en una situación real. Si es útil como base de comparación entre distintos buques o entre buques del mismo tipo bajo diferentes condiciones de operación.



4.4.6 Una medida de lo suave o rígido de un buque:

La pendiente inicial de la curva de estabilidad estática intacta indica la velocidad a la que se desarrolla un brazo de adrizamiento a medida que la nave se inclina hacia una banda.

Si la pendiente inicial es grande, el brazo de adrizamiento se genera rápidamente a medida que la nave se inclina y se dice que esta nave es "rígida". Una nave rígida tendrá un período corto de balance y reaccionará enérgicamente a los momentos escorantes externos. El buque intentará adrizarse rápidamente y con fuerza. Si es demasiado rígido, causará aceleraciones violentas al recuperarse, las que pueden dañar la estructura del buque, la carga y al personal.

Si la pendiente inicial es pequeña, el brazo de adrizamiento se generará lentamente a medida que el buque se inclina y se dice que el buque es "suave". En esta condición un buque tendrá un largo período de balanceo y reaccionará lentamente a los momentos externos de escora. Un buque demasiado suave puede comprometer la estabilidad y dejar muy poco margen para volcarse.

4.5 Características que se obtienen de la Curva de Estabilidad Estática Intacta

Hemos visto que la curva de estabilidad estática intacta se puede crear a partir de las curvas cruzadas de estabilidad; sin embargo, las curvas cruzadas asumen normalmente un valor para $KG = 0$ (ft). Para obtener la verdadera curva del brazo de adrizamiento, los valores de las curvas transversales deben corregirse para la posición vertical de G real. Esto se logra utilizando la corrección sinusoidal.

Hay 2 casos en que la corrección sinusoidal es necesaria.

- Para corregir de la curva de estabilidad estática intacta para la posición vertical real de G .
- Para corregir la curva de estabilidad estática intacta por cambios en la posición de KG .

La teoría detrás de la corrección del seno se puede ver mediante un análisis de la Figura 4.6. Es obvio por la Figura que un aumento en KG disminuye el brazo de adrizamiento. Si G_v es la ubicación vertical final del centro de gravedad, y G_o es su ubicación inicial, entonces el valor de $G_v Z_v$ en cada ángulo de escora se puede encontrar utilizando la siguiente relación:

$$G_v Z_v = G_o Z_o - G_o Z_v \text{ seno } \phi$$

Donde: $G_v Z_v$ es el brazo de adrizamiento creado por la posición final del centro de gravedad (unidades de longitud)

$G_o Z_o$ es el brazo de adrizamiento creado por la posición inicial del centro de gravedad (unidades de longitud)

$G_o Z_v$ es la distancia vertical entre G_o y G_v (unidades de longitud)

$G_o Z_v \text{ seno } \phi$ es el término de la corrección por seno (unidades de longitud)



Esta ecuación se hace evidente en la Figura 4.6 al examinar el triángulo rectángulo G_0PG_V y observar que la distancia G_VZ_V es la misma que la distancia PZ_0

$$G_VZ_V = PZ_0 = G_0P \text{ y } G_0P = G_0Z_V \text{ seno}\phi$$

$$G_VZ_V = G_0Z_0 - G_0Z_V \text{ seno}\phi$$

Los alumnos debiesen ser capaces de dibujar la Figura 4.6 y de derivar la corrección sinusoidal de esta Figura.

Un análisis similar al de la Figura 4.6 debería revelar que, si se reduce KG, se debe sumar la corrección por seno.

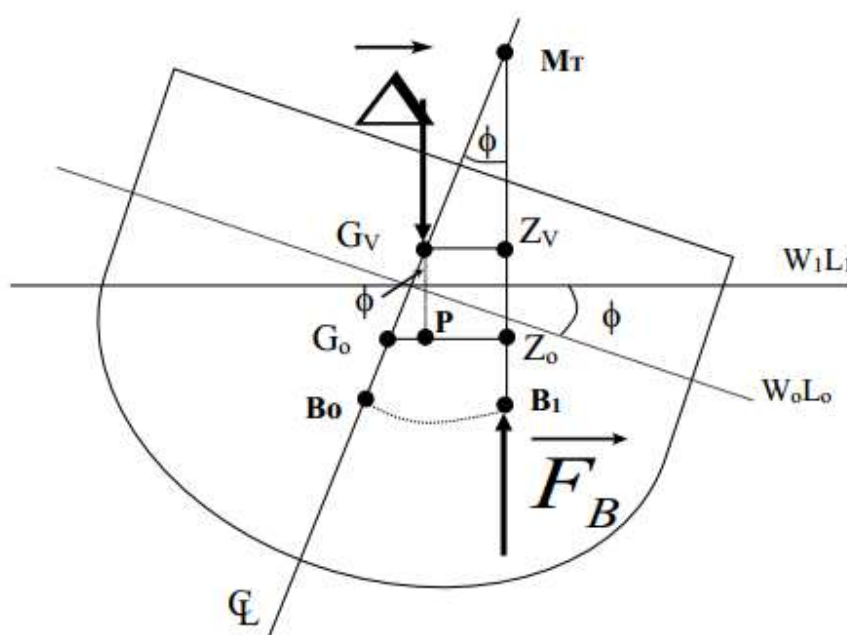


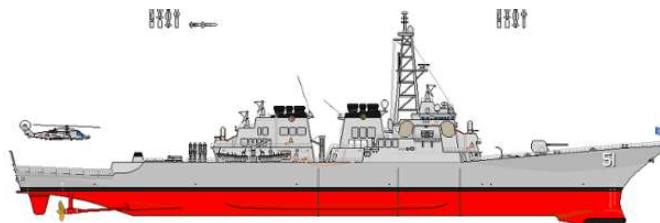
Figura 4.6 La derivación de la corrección por seno

En esta figura, se definen los siguientes segmentos:

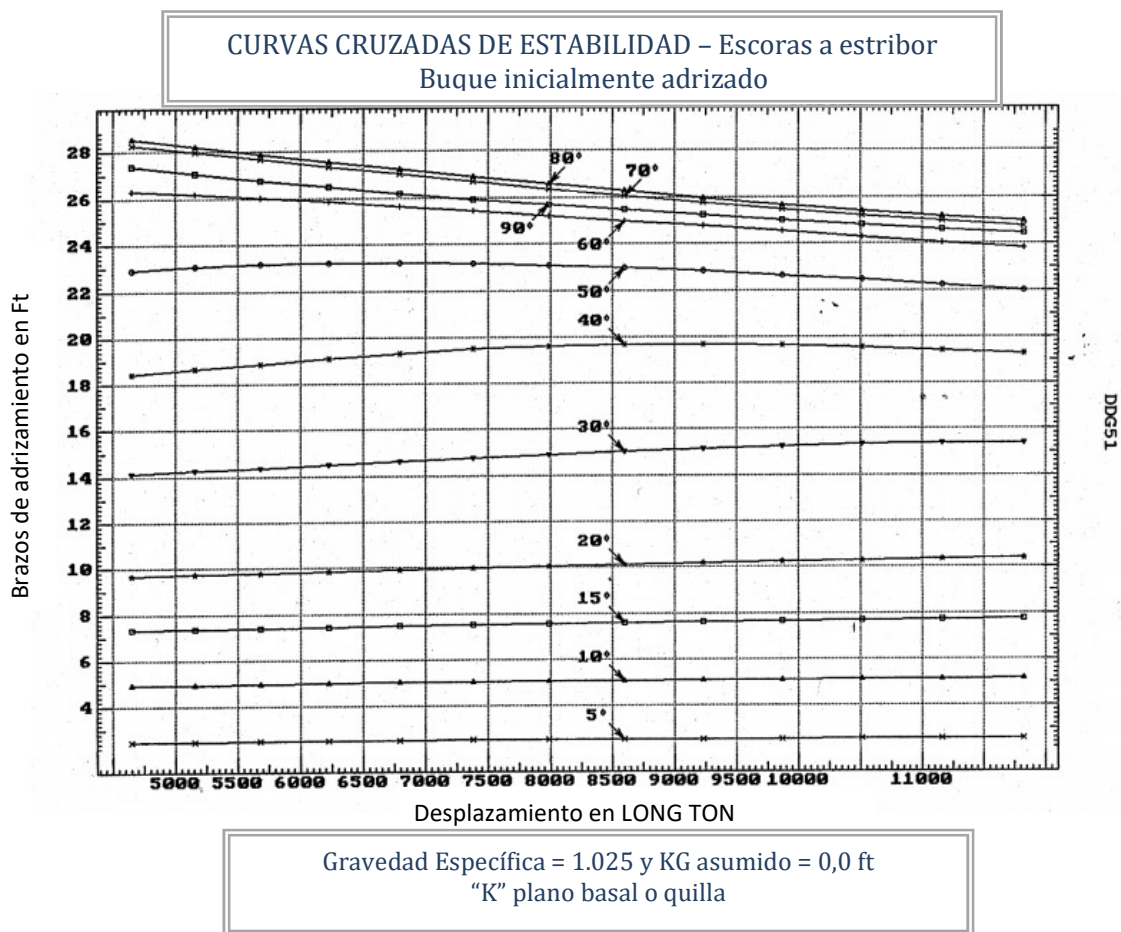
W_0L_0	es la línea de flotación original
W_1L_1	es la nueva línea de flotación.
G_0Z_0	es el brazo de adrizamiento antes de un cambio en el centro de gravedad
G_VZ_V	es el brazo de adrizamiento después de un cambio en el centro de gravedad.
B_1	es el centro de boyantez después de que el buque se escoró.
B_0	es el centro de boyantez antes de que el buque se escoró.



Ejemplo 4.1 Dibuje la curva de estabilidad estática intacta para un DDG-51 suponiéndole un desplazamiento de 8600 LT y un centro de gravedad vertical de 23.84 pies por sobre la quilla. Grafique los valores de GZ_{90} y G_{VZ_V} en función del ángulo de escora en la curva de estabilidad estática intacta.



Utilice las siguientes curvas cruzadas para el DDG-51





Solución: La forma general de la corrección sinusoidal en cada ángulo es:

$$G_vZ_v = G_0Z_0 - 23.84 \text{ seno}\phi$$

Por ejemplo, para 20° de escora

$$G_vZ_v = 10,10 - 23.84 \text{ seno}20 = 1,95 \text{ ft}$$

Sin embargo, a menudo es más conveniente utilizar una tabla.

Ángulo de escora ϕ (grados)	0	5	10	15	20	30	40
Brazo de adrizamiento de las curvas cruzadas G_0Z_0 (ft)	0	2,55	5,08	7,60	10,10	15,02	19,67
Corrección por seno (ft)	0	2,08	4,14	6,17	8,15	11,91	15,31
Brazo de adrizamiento corregido G_vZ_v (ft)	0	0,47	0,94	1,43	1,95	3,11	4,36

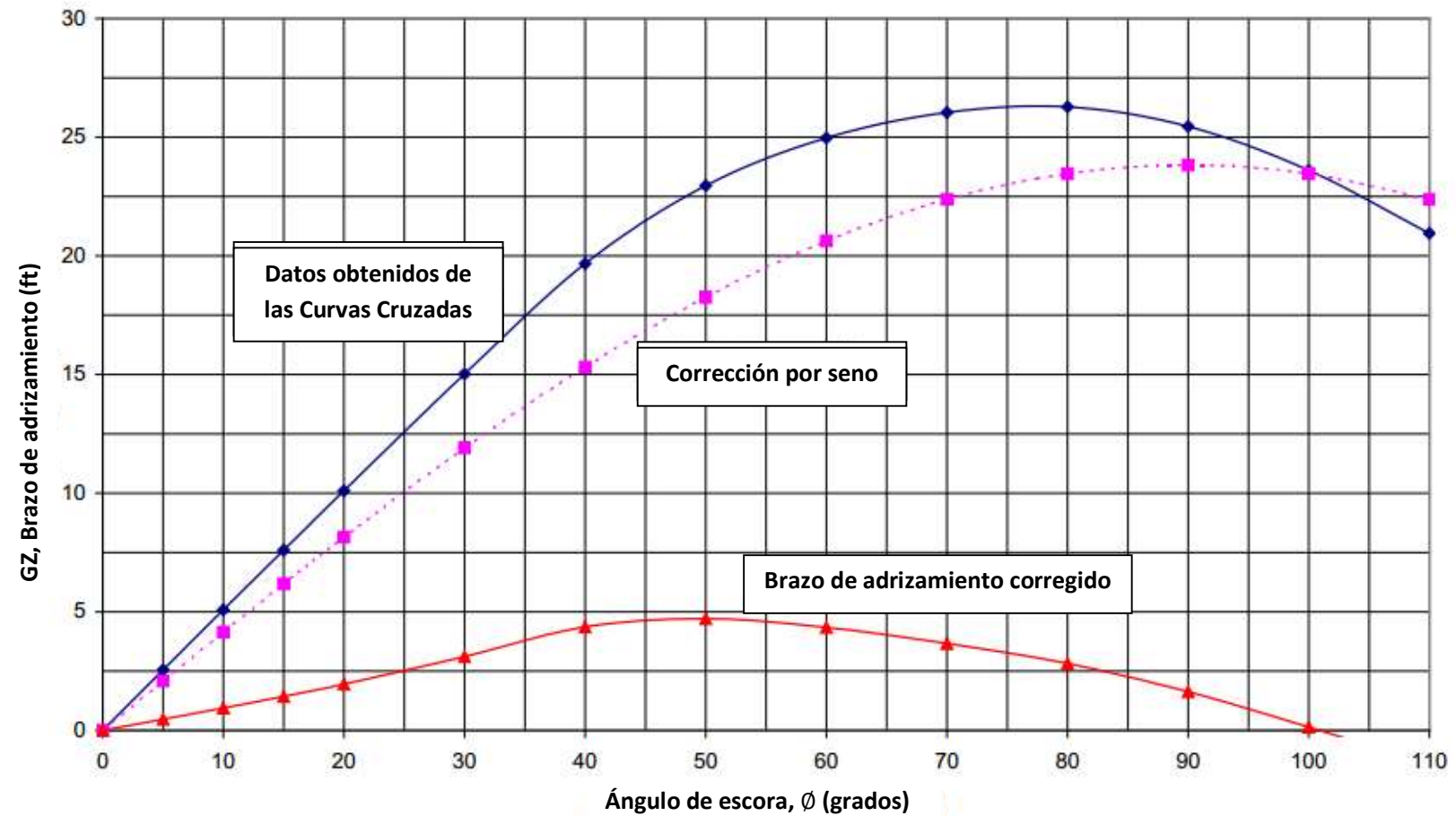
Ángulo de escora ϕ (grados)	50	60	70	80	90	100	110
Brazo de adrizamiento de las curvas cruzadas G_0Z_0 (ft)	22,95	24,97	26,04	26,28	25,45	23,60 (dado)	20,95 (dado)
Corrección por seno (ft)	18,25	20,63	22,38	23,46	23,84	23,46	22,38
Brazo de adrizamiento corregido G_vZ_v (ft)	4,710	4,34	3,66	2,84	1,63	0,14	-1,43

Cuando se grafican, estos nuevos valores G_vZ_v darán una Curva de estabilidad estática intacta para DDG-51 que la que corresponde a un desplazamiento de 8600 LT y un $KG = 23.84$ pies. Si el desplazamiento cambia, entonces deben obtenerse nuevos valores G_0Z_0 a partir de las Curvas cruzadas y se deben corregir para KG . Si KG cambia, entonces se puede hacer una corrección sinusoidal entre 23.84 pies y el nuevo valor de KG .



Ejemplo 4.1 - Curva de Estabilidad Estática

DDG-51 a 8600 LT, KG = 23.84 pies.





4.6 Efectos de un cambio transversal del centro de gravedad en el brazo de adrizamiento (GZ) de un buque: corrección de coseno

El análisis de estabilidad hasta el momento ha considerado el centro de gravedad en la línea de crujía del buque, o TCG = 0 m o ft. En el Capítulo 3 se analizó que el centro de gravedad se puede alejar de la crujía mediante embarque, desembarque o movimientos de pesos, como embarcar carga, el consumo de combustible de estanques laterales y el movimiento del personal. Cuando esto ocurre, hay un efecto sobre la estabilidad de la nave.

El efecto de un cambio transversal en G sobre la estabilidad del buque se puede calcular utilizando la corrección por coseno.

Hay 2 casos en que la corrección de coseno es necesaria.

- Corrección de la curva de estabilidad intacta para la posición transversal real de G.
- Corrección de la curva de estabilidad intacta por cambios en TCG.

El análisis de la Figura 4.7 que muestra un cambio en la ubicación transversal de G desde crujía, permite cuantificar la corrección por coseno. El nuevo brazo de adrizamiento se puede calcular para cada ángulo de escora usando la siguiente ecuación.

$$G_t Z_t = G_v Z_v - G_v G_t \cos \emptyset$$

Donde:	$G_t Z_t$	es el brazo de adrizamiento corregido (unidades de longitud)
	$G_v Z_v$	es el brazo de adrizamiento no corregido (unidades de longitud)
	$G_v G_t$	es la distancia transversal desde la línea de crujía entre G_0 y G_v al centro de gravedad (unidades de longitud)
	$G_v Z_t \cos \emptyset$	es el término de la corrección por coseno (unidades de longitud)

Esta ecuación resulta evidente de la figura 4.7 observando el ángulo recto agrandado al costado superior derecho de la figura.

Ud. debiese ser capaz de dibujar la Figura 4.7 y de derivar la corrección por coseno desde esta Figura.

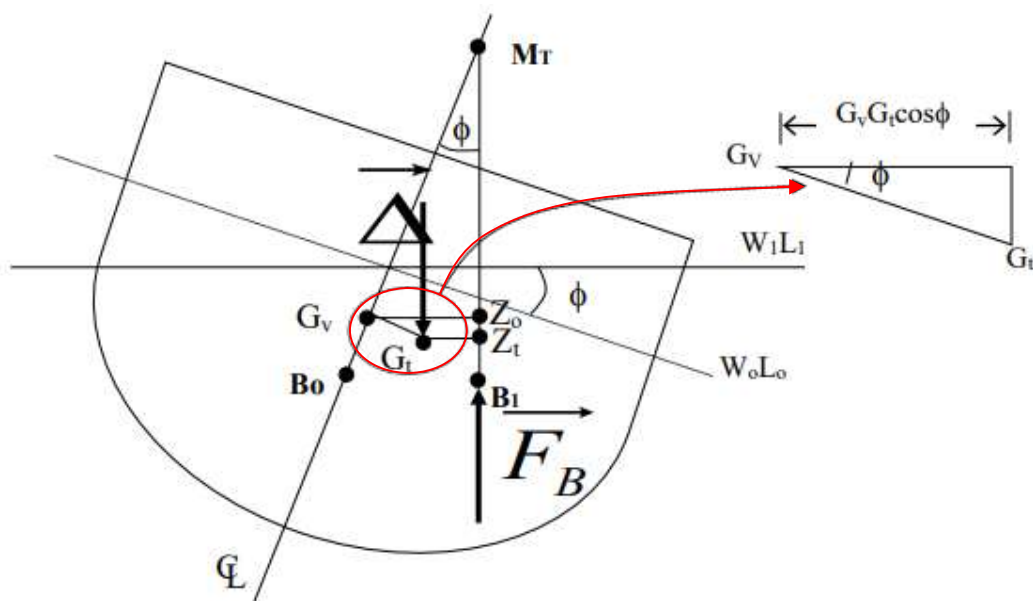


Figura 4.7 Derivación de la corrección por coseno

El nuevo brazo de adrizamiento (G_tZ_t) creado por el movimiento transversal del centro de gravedad, es más pequeño que el brazo de adrizamiento original (G_0Z_0).

No obstante, si en estas condiciones el buque se hubiese escorado hacia la banda contraria (babor en este caso), se habría incrementado el brazo de adrizamiento por sobre el original (G_0Z_0). Ello se puede demostrar confeccionando un diagrama similar a la Figura 4.7 que muestre el efecto para el lado contrario al cambio de peso. En este caso, la corrección por coseno sería sumada a (G_0Z_0) para calcular el brazo de adrizamiento corregido.



Ejemplo 4.2 Para un DDG51 que tiene un desplazamiento de 8600 LT, una posición vertical del centro de gravedad de 23,84 pies sobre la quilla y una ubicación transversal del centro de gravedad de 0.4 pies hasta el estribor de crujía, grafique la curva de estabilidad estática intacta. (Utilice las curvas cruzadas del ejemplo 4.1 de la página 15)

Solución: (Las primeras 4 filas fueron obtenidas del ejemplo 4.1)

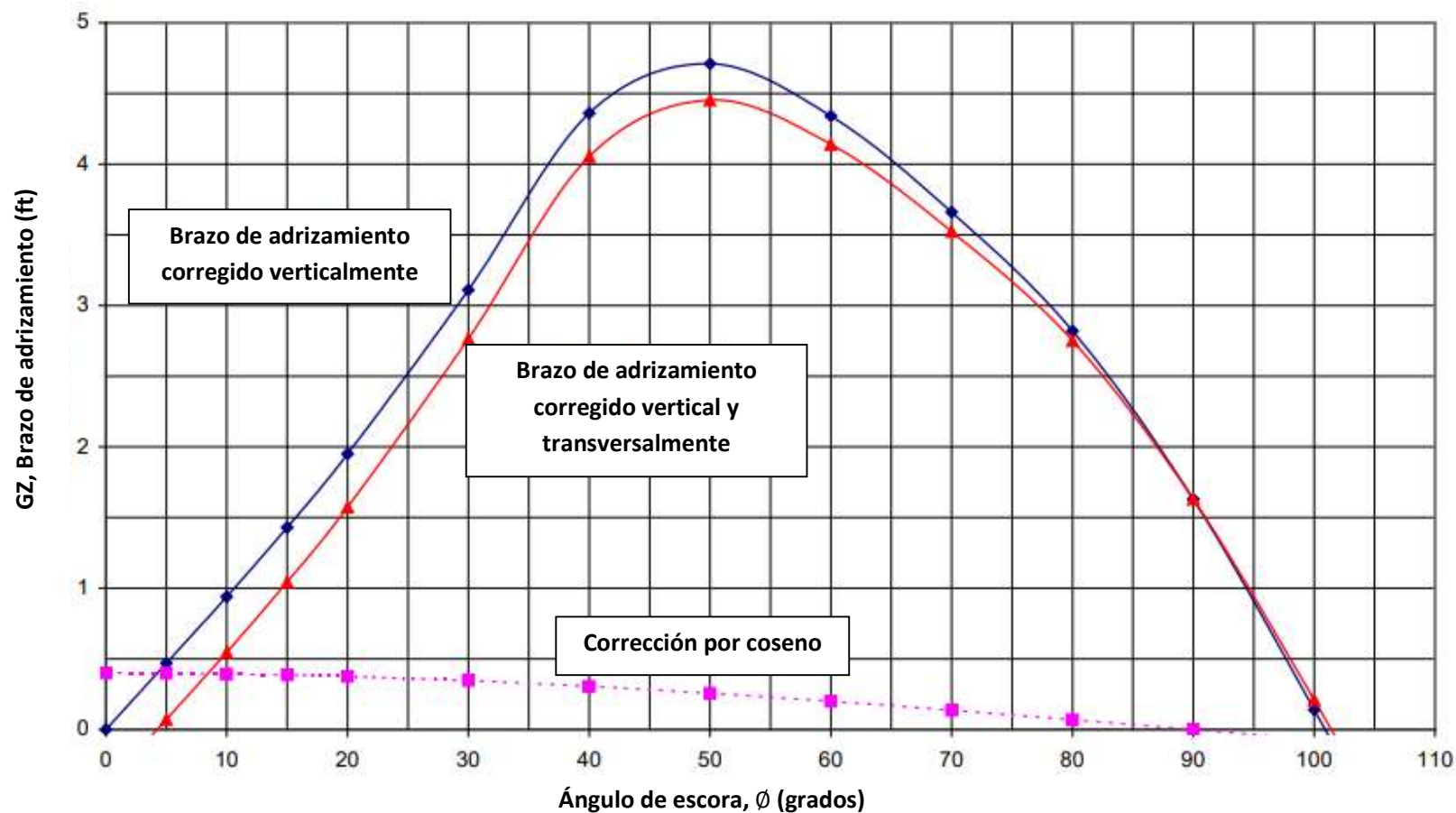
Ángulo de escora ϕ (grados)	0	5	10	15	20	30	40
Brazo de adrizamiento de las curvas cruzadas G_0Z_0 (ft)	0	2,55	5,08	7,60	10,10	15,02	19,67
Corrección por seno (ft)	0	2,08	4,14	6,17	8,15	11,91	15,31
Brazo de adrizamiento corregido G_vZ_v (ft)	0	0,47	0,94	1,43	1,95	3,11	4,36
Corrección por coseno (ft)	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,35	0,31
Brazo de adrizamiento corregido transversalmente G_tZ_t (ft)	-0,40	0,07	0,55	1,04	1,57	2,76	4,05

Ángulo de escora ϕ (grados)	50	60	70	80	90	100	110
Brazo de adrizamiento de las curvas cruzadas G_0Z_0 (ft)	22,95	24,97	26,04	26,28	25,45	23,60	20,95
Corrección por seno (ft)	18,25	20,63	22,38	23,46	23,84	23,46	22,38
Brazo de adrizamiento corregido G_vZ_v (ft)	4,710	4,34	3,66	2,84	1,63	0,14	-1,43
Corrección por coseno (ft)	0,26	0,20	0,14	0,07	0	-0,07	-0,14
Brazo de adrizamiento corregido transversalmente G_tZ_t (ft)	4,45	4,14	3,52	2,75	1,63	0,21	-1,29



Ejemplo 4.2 - Curva de estabilidad estática

DDG-51 con $\Delta = 8600$ LT, $KG = 23,84$ pies, $TCG = 0,4$ pies





Se debe considerar lo siguiente en los cambios de peso transversal:

- Como ocurre en el caso de un aumento vertical del centro de gravedad, un desplazamiento horizontal alejándose de la línea de crujía, provoca un deterioro en las características de estabilidad en la banda a la que G se desplaza, lo que es evidente en el ejemplo recién realizado.
- Un desplazamiento horizontal mejora las características de estabilidad en la banda opuesta al que se desplazó G. Esto puede explicar la necesidad de compensar con el cuerpo un velero pequeño para evitar que se vuelque con viento fuerte.
- Vuelta de Campana. Es interesante notar que de acuerdo con las curvas calculadas, el buque se volcará con un ángulo mayor cuando G se ha alejado de la línea de crujía. En la realidad, el buque se volcará antes de alcanzar la escora en el que GZ se haga igual a 0, debido a que las curvas no toman en cuenta el hecho de que en ángulos extremos de escora, se sumergirán sectores del buque que no son estancos al agua (Ductos de aspiración y descarga de los motores propulsores, sistemas de ventilación y otros del mismo índole), lo que ocasionará que el agua ingrese al interior de la nave, provocando que se de vuelta de campana entre 10 y 20 grados antes de alcanzar la escora predicha por las curvas. Adicionalmente hay que tener en cuenta que, a ángulos extremos de escora, es probable que la carga y equipos se suelten y se desplacen dentro del buque disminuyendo aún más la estabilidad.

Ejercicio para el alumno: La Figura 4.8 representa la curva de estabilidad estática de un DDG-51 con un centro de gravedad desplazado 0.4 pies hacia estribor, un desplazamiento de 8600 LT y un KG de 23,84 pies. Complete la Figura 4.8 de la página subsiguiente con los diagramas en sección para cada uno de los puntos indicados en la figura 4.7. En sus diagramas incluya G, B, Δ_s , F_B , etc.

(Esto es similar a la Figura 4.3, pero esta vez hay un cambio transversal en el centro de gravedad).

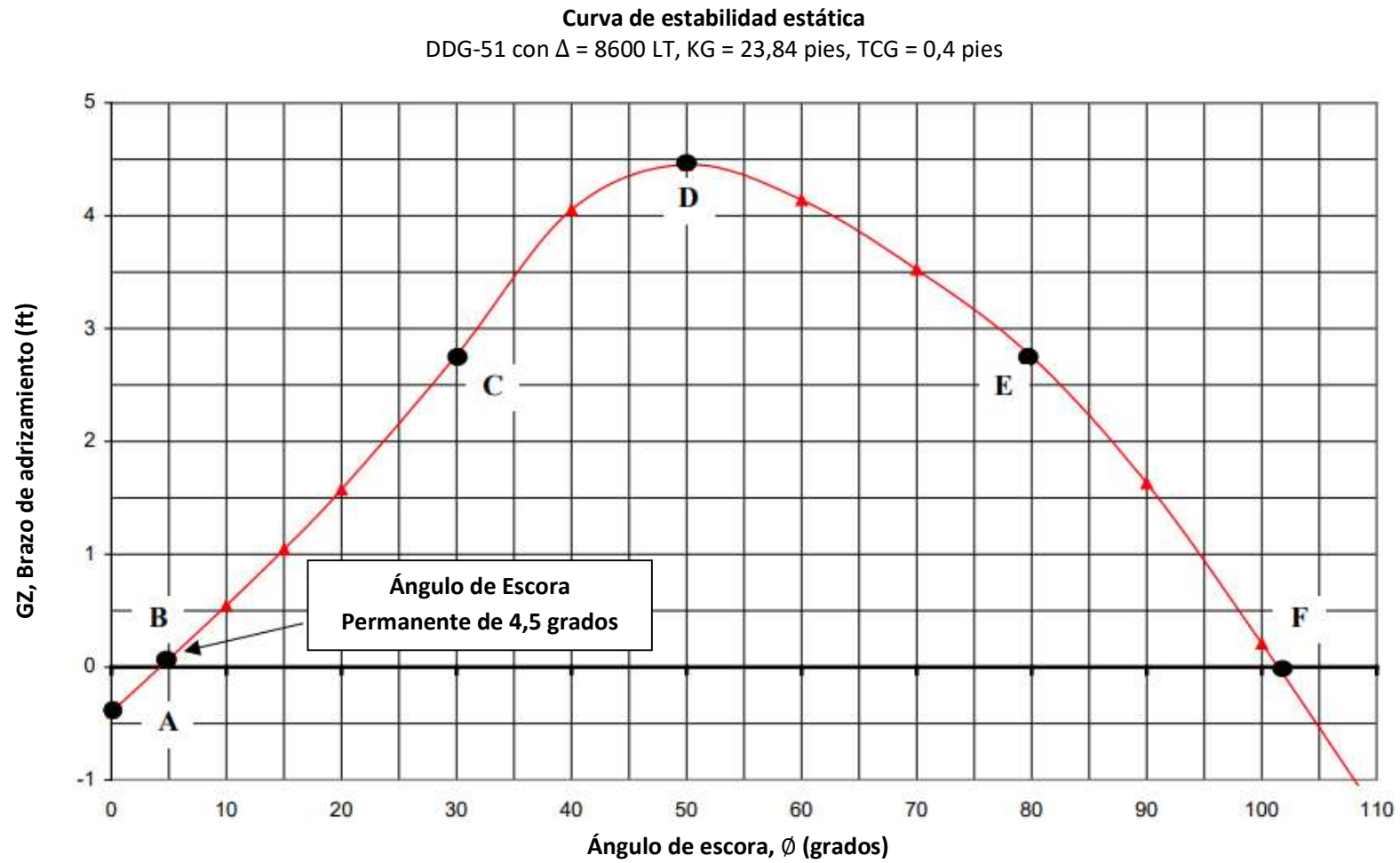


Figura 4.8 Curva de Estabilidad Estática para ejercicio del Alumno



Punto A – 0° de escora	Punto B – 4,5° de escora
Punto C – 30° de escora	Punto D – 50° de escora
Punto E – 80° de escora	Punto F – 102° de escora

Figura 4.8 Diagramas de vectores asociados a la Figura 4.7



4.7 Estabilidad Dañada

Los buques están diseñados para desempeñarse en un medio peligroso en el que ya sea por acciones de terceros, de la naturaleza u otros inevitables, puede dañarse la obra viva y entrar agua al casco generando varios efectos adversos que degradan su estabilidad; generan incrementos de calado, cambios de asiento, escoras permanentes y en circunstancias extremas la pérdida del buque.

En esta sección analizará el comportamiento básico de una nave dañada y se introducirán 2 técnicas para evaluar y analizar las consecuencias de ello:

- El método de pérdida de flotabilidad.
- El método de peso agregado.

El método de pérdida de flotabilidad será analizado someramente, en cambio el método de peso agregado se cubrirá con un poco más de profundidad utilizando cálculos simplificados para buques.

Entre otros se analizarán diferentes estándares de Estabilidad Dañada para tener una idea de cómo responderá su buque conocer cuánto es el máximo daño que soporta por diseño.

4.7.1. Método de la Pérdida de Boyantez

Una forma de examinar el comportamiento de un buque dañado es por el método de pérdida de boyantez. En este método se analizan los cambios en la boyantez en lugar de analizar el cambio en el centro de gravedad. En pocas palabras, se asume que el centro de gravedad sigue siendo el mismo (el peso del buque, el metal, etc. se mantiene constante) y cualquier cambio que ocurre es debido al daño afecta al volumen de boyantez.

El volumen total de boyantez debe permanecer constante ya que el desplazamiento del buque no ha cambiado. Cuando la obra viva se daña, se pierde parte de la estructura que estaba generando boyantez, y debe ser compensado por otra parte de esa estructura. Con ello el calado aumentará y la nave puede escorarse y cambiar de asiento hasta que se compense el volumen de boyantez perdido y vuelva a ser adecuado al desplazamiento del buque.

El método de pérdida de boyantez permite modelar matemáticamente a una nave dañada para que los calados finales, la escora y el asiento se puedan determinar a partir del análisis del daño que sufrió el casco. El constructor naval analiza cada escenario de daño posible y genera un manual de estabilidad dañada que puede ser utilizado por la tripulación en caso de inundación. El uso de este método de pérdida de boyantez permite obtener "un conocimiento previo" de la condición de estabilidad resultante para que se puedan escribir y seguir los procedimientos apropiados en caso de una abertura en el casco.



4.7.2. Método del Peso Agregado

Otro método para evaluar la estabilidad de un buque dañado es con el método de "Peso Agregado". Como su nombre lo indica y al revés de lo mencionado en la "Pérdida de boyantez", en esta técnica se supone que el casco del buque (obra viva) no está dañado, pero una parte se inundó con el agua en la que flota. Esto es equivalente a un aumento de peso y puede modelarse utilizando las técnicas de movimientos en el centro de Gravedad (G) vista en el Capítulo 3.

Asumiendo que se conoce el volumen del compartimiento dañado, su ubicación promedio con respecto a la Línea de crujía, Quilla y las Cuaderna Maestra y la densidad del agua, se puede predecir el cambio en G junto con las consecuencias de este cambio genera en el calado, el asiento y en la escora de la nave.

4.7.2.1 Permeabilidad

Una complicación adicional al análisis de la estabilidad del buque dañado es considerar el espacio disponible que tiene un compartimiento inundado para que le ingrese agua a su interior.

Es raro que cuando un compartimiento se inunda, sea un espacio vacío que todo su volumen pueda ser llenado con agua. Ello se debe a que cualquier compartimiento de un buque tiene refuerzos estructurales, equipos y eventualmente carga y pertrechos. La relación entre el volumen que puede ser ocupado por el agua y el volumen total se conoce como "permeabilidad".

$$\text{Permeabilidad} = \frac{\text{Volumen disponible para inundarse}}{\text{Volumen total del compartimiento}} = \mu$$

Para calcular el volumen afectado,

$$\nabla_{\text{inundado}} = \nabla_{\text{total}} \times \mu \times (\% \text{ inundado})$$



La siguiente tabla, obtenida de “Teoría básica del Buque – 4ta edición de Rawson & Tupper” es un listado que representa la permeabilidad típica de algunos departamentos.

Espacio	Permeabilidad (%)
Espacio estanco de un buque de guerra	97
Espacio estanco de un buque mercante	95
Espacios de acomodaciones	95
Espacios de maquinaria	85
Bodegas de carga seca	70
Estanques, bodegas o espacios de carga	60

Ahora deberíamos estar en condiciones de realizar cálculos de incrementos simples de peso por daño estructural del casco.

Ejemplo 4.3 Una Adelaide (FFG-7) que desplaza 3.992 LT y tiene una longitud de 408 pies tiene un KG = 18.5 pies, TCG = 0 pies. Está flotando en agua de mar con un calado parejo de 16.0 pies. A este calado, el TPI = 33.0 LT/in, MT1 " = 793.4 LT-ft/in y el LCF = 24.03 ft a popa de la cuaderna Maestra.

Una colisión genera la inundación completa del espacio de maquinaria auxiliar. Este espacio tiene un volumen de 6.400 pies³, una permeabilidad del 85% y tiene un centroide en la línea de crujía, a 6.6 pies sobre la quilla y 30 pies a proa de la cuaderna maestra.

Calcular:

- Su KG en condición dañada.
- TCG en la condición dañada.
- El calado de proa en la condición dañada.



Solución:

- a. Volumen disponible para inundarse = permeabilidad $\times$ volumen

$$\text{Volumen disponible para inundarse} = 0,85 \times 6.400 \text{ ft}^3 = 5.400 \text{ ft}^3$$

Volumen de agua en el compartimiento = ρg (volumen inundable)

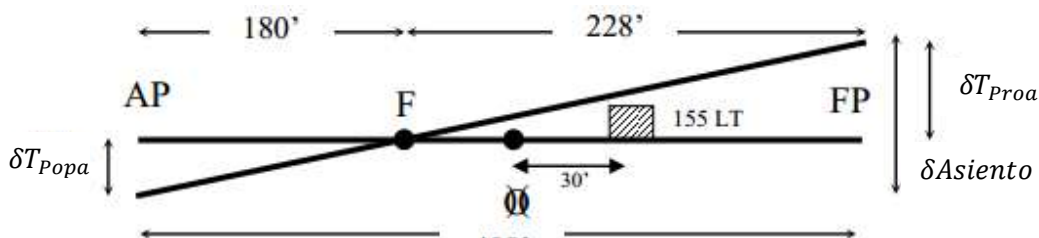
$$\text{Volumen} = 1,99 \frac{\text{lb} - \text{s}^2}{\text{ft}^4} \times 32,17 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \times 5.400 \text{ ft}^3 \times \frac{1 \text{ LT}}{2.240 \text{ lb}} = 155 \text{ LT}$$

$$KG_{\text{dañado}} = \frac{KG_{\text{inicial}} \times \Delta_{\text{inicial}} + w_{\text{inundación}} \times kg_{\text{inundación}}}{\Delta_{\text{dañado}}}$$

$$KG_{\text{dañado}} = \frac{18,5 \text{ ft} \times 3.992 \text{ LT} + 155 \text{ LT} \times 6,6 \text{ ft}}{3.992 \text{ LT} + 155 \text{ LT}} = 18,06 \text{ ft}$$

- b. $TCG_{\text{dañado}} = TCG_{\text{inicial}} = 0 \text{ ft}$

c.



$$\delta \text{Asiento} = \frac{wl}{MT1''} = \frac{155 \text{ LT} \times (24 + 30) \text{ ft}}{793,4 \frac{\text{ft} - \text{LT}}{\text{in}}} \times \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} = 0,88 \text{ ft}$$

$$\delta T_{\text{hundimiento paralelo}} = \frac{w}{TPI} = \frac{155 \text{ LT}}{33,0 \frac{\text{LT}}{\text{in}}} \times \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} = 0,39 \text{ ft}$$

Del diagrama de Asiento

$$\frac{\delta T_{\text{proa}}}{dF_{PP\text{proa}}} = \frac{\delta \text{Asiento}}{L_{PP}} \Rightarrow \delta T_{\text{proa}} = dF_{PP\text{proa}} \frac{\delta \text{Asiento}}{L_{PP}} = 228 \text{ ft} \times \frac{0,88 \text{ ft}}{408 \text{ ft}}$$

$$\delta T_{\text{proa}} = 0,49 \text{ ft}$$

$$\therefore T_{\text{proa dañado}} = T_{\text{inicial proa}} + \delta T_{\text{hundimiento paralelo}} + \delta T_{\text{proa}}$$

$$\therefore T_{\text{proa dañado}} = 16,0 \text{ ft} + 0,39 \text{ ft} + 0,49 \text{ ft} = 16,88 \text{ ft}$$



4.7.3. Criterios de diseño para estabilidad aceptada por normas internacionales.

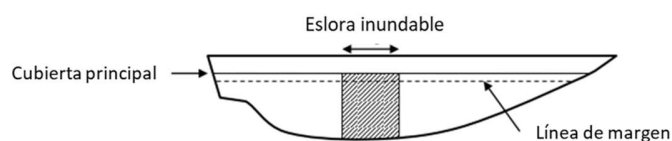


Figura 4.10 Ilustración de los términos de estabilidad dañada

Línea de margen Por la línea de margen se define a la línea de agua de mayor calado permitida en el costado de un buque para cualquier plano de flotación en condición dañado antes de alcanzar la máxima inmersión del casco, asiento y/o escora previa al hundimiento. Para fines de diseño, no se permite que sea inferior a 3 pulgadas (0.075 m) bajo la cubierta estanca principal.

Escora La escora causada por daño no debe ser mayor de 20 grados. A estas inclinaciones el ángulo es demasiado grande para la operación continua de los equipos. En general la maquinaria a bordo está diseñada para operar indefinidamente con una escora permanente de 15 grados, aunque la mayoría de ellos probablemente permanecerá en funcionamiento hasta unos 25 grados durante al menos unas pocas horas.

El personal puede continuar con los esfuerzos de control de verías en forma efectiva con una escora permanente de 20 grados y el buque tendrá una estabilidad adecuada para soportar viento y olas mientras es remolcado o se desplaza por sus propios medios a puerto seguro.

Extensión del daño al casco:

1. Para buques de eslora inferior a 100 pies (30,5 mts) deben soportar la inundación de a lo menos un compartimiento estanco cualquiera sin hundirse.
2. Para buques de entre 100 a 300 pies de eslora (30,5 a 90 mts) deben soportar inundaciones en los dos compartimentos adyacentes cualquiera.
3. Los buques de guerra, los transportes de tropas y las naves hospitalarias de más de 300 pies de eslora (90 mts), deben ser capaces de soportar una abertura en el casco del 15% de la longitud de la eslora entre perpendiculares.
4. Cualquier otro buque con una eslora mayor a 300 pies (90 mts), debe soportar una rotura del casco del 12.5% de la eslora entre perpendiculares.



4.7.4. Hundimiento

Un buque dañado puede perderse de varias formas diferentes.

- Si queda con un momento de adrizamiento máximo inadecuado o con una estabilidad dinámica insuficiente, puede hundirse por efecto del mar y del clima.
- Si el ángulo de la escora o de asiento es muy grande, sumergiendo partes no estancas del buque que generarán inundaciones adicionales. En esta condición, se puede perder estabilidad transversal y darse vuelta de campana.
- Lo anterior también puede ocurrir cuando se pierde la estabilidad longitudinal, provocando que el buque se hunda por la proa o por la popa. Uno de los ejemplos más notables de hundimiento del Titanic.
- Un buque puede perderse incluso si su estabilidad no se ha visto comprometida. Simplemente se puede hundir por una inundación.

Lo mencionado en los párrafos anteriores se refiere a buques en condición estática, lo que significa que habiendo ocurrido el daño, el buque se mantenía en equilibrio. Desde el momento en que ocurre el daño hasta que se alcanza el equilibrio dañado, el buque está en una condición muy vulnerable. El agua ingresa a raudales y los cambios repentinos en el volumen efectivo causan una serie de efectos dinámicos adversos en la estabilidad ya reducida.

En algunos casos es útil inundar algún estanque lateral y opuesto al daño para reducir el ángulo de la escora y disminuir el KG. Esto se llama contra inundación. Sin embargo, estas contra inundaciones pueden ser muy peligrosas ya que generan incrementos en el desplazamiento, aumentando el calado y este aumento de calado provoca una pérdida de francobordo y una reducción en el ángulo de la escora disponible antes de que la borda de la cubierta principal quede bajo el agua.

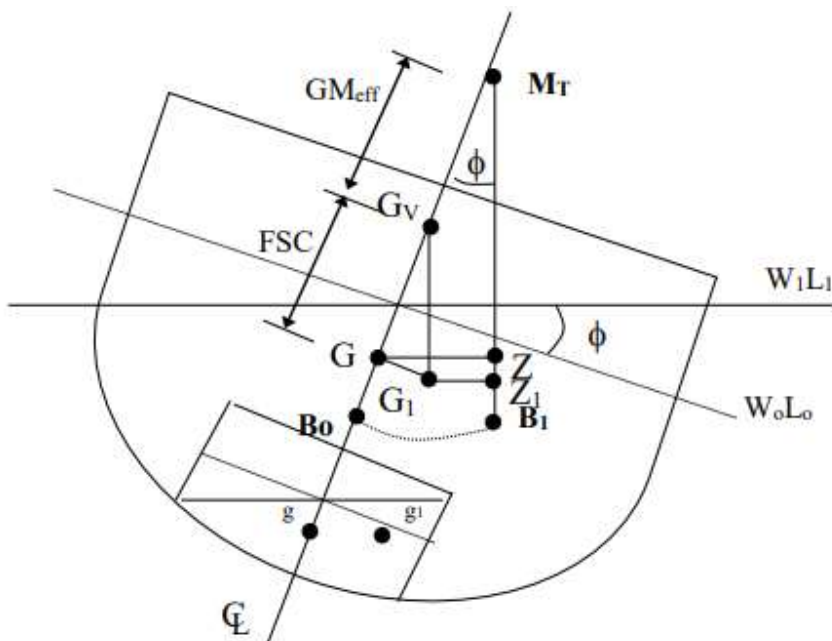
El aumento en el desplazamiento también puede hacer que el calado resultante sea mayor que el máximo aceptable, generándose problemas adicionales en la estabilidad y efectos estructurales dañinos. Si la contra inundación no se realiza correctamente, existe una alta posibilidad de generar un aumento en la superficie libre, agravando el problema de estabilidad ya existente.

4.8 Corrección de Superficie libre a pequeños ángulos de escora

Un efecto de superficie libre se genera por un fluido que puede moverse libremente, como el agua en un estanque parcialmente lleno. Con los balances del buque, el fluido en el interior del estanque se mueve. El movimiento del fluido actúa como un cambio de peso generando movimientos en el centro de gravedad del fluido, lo que a su vez desplaza el centro de gravedad del buque tanto vertical como horizontalmente. El efecto del desplazamiento vertical es insignificante a ángulos de escora pequeños (de 5 a 7°) y no se considera, pero el movimiento horizontal (transversal) genera un desplazamiento del centro de gravedad que causa una disminución en el brazo de adrizamiento (GZ).



En la Figura 4.11 muestra gráficamente que un aumento vertical del centro de gravedad causa una disminución en el brazo de adrizamiento. La distancia que el centro de gravedad tendría que aumentar para causar una reducción en el brazo de corrección equivalente a la causada por el desplazamiento transversal se llama Efecto de Superficie Libre (FSC). La posición de este nuevo centro de gravedad se llama centro de gravedad "virtual" (G_v). La distancia desde el centro de gravedad virtual al metacentro se llama Altura Metacéntrica Efectiva (GM_{eff}).



Note que $\phi < 5 \sim 7^\circ$ (La escora en el dibujo está exagerada para mostrar la geometría)

Figura 4.11 Efecto de Superficie Libre

4.8.1. Efectos estáticos

Los Efectos de Superficie Libre estáticos son adversos: generan un incremento virtual del Centro de Gravedad, disminuyen el rango de estabilidad, generan un brazo de adrizamiento máximo más pequeño, un ángulo en el que se produce el GZ max menor, escoras y cambios de asiento más pronunciados cuando el buque se está balanceando o cabeceando.

4.8.2. Efectos dinámicos

Cabe señalar que el análisis anterior se refiere a los efectos estáticos de la superficie libre. No tiene nada que ver con los efectos dinámicos del agua desplazándose libremente de un lado a otro. Este efecto también es perjudicial pero no se representa en la corrección de superficie libre. **Es un error común mezclar los efectos dinámicos de la superficie libre con el análisis estático y la corrección de superficie libre.**

Para comprender los efectos dinámicos, llene un recipiente de plástico tipo Tupperware hasta la mitad con agua, ciérralo con una tapa y póngalo en la palma de tu mano. Mueva el contenedor simulando escoras y cabeceos. Note cómo la geometría afecta la magnitud



del rolido cuando el contenedor se mueve a una condición de escora versus la condición de cabeceo. Otro ejemplo del efecto dinámico es un camión de bomberos que transporta agua por el camino. Si no se colocan deflectores en el tanque, el camión literalmente salta de lado a lado debido a al agua moviéndose de adelante hacia atrás. Los deflectores son una buena forma de minimizar los efectos dinámicos de la superficie libre.

4.8.3. Cálculo de la corrección de superficie libre y del GM efectivo

La corrección de superficie libre (CSL ó FSC) creado dentro de un estanque en el interior de un buque se calcula por la siguiente ecuación:

$$FSC = \frac{\rho_t i_t}{\rho_s \nabla_s}$$

Donde; ρ_t es la densidad del fluido dentro del estanque (kg/m^3) ó ($lb - s/ft^4$)
 ρ_s Es la densidad del agua en la que flota el buque (kg/m^3) ó ($lb - s/ft^4$)
 ∇_s Es el volumen sumergido del buque (m^3 ó ft^3)
 i_t Es el segundo momento de inercia del área de la superficie libre del estanque (m^4 ó ft^4)

Nota: estanque es sinónimo de compartimiento o espacio cuando se hable/calcule los efectos de superficie libre en estabilidad dañada

4.8.3.1 Segundo Momento de Inercia de Área (i_t)

La ecuación para calcular el segundo momento de inercia del área de un rectángulo está dada por la siguiente expresión:

$$i_t = \frac{(Largo) \times (Ancho)^3}{12}$$

$$i_t = \frac{l \times b^3}{12}$$

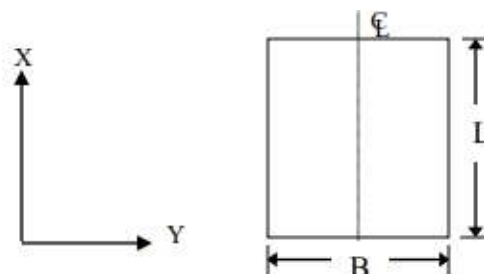


Figura 4.12 Geometría de un estanque por FSC

La corrección de Superficie Libre se aplica a la altura metacéntrica inicial para encontrar la altura metacéntrica efectiva:

$$GM_{efect} = GM - FSC = KM - KG - FSC$$



4.8.4. Minimizando los Efectos de Superficie Libre

- **Compartimentación:** Una evaluación rápida de la ecuación para i_t y FSC mostrada anteriormente permite revelar que dividir un tanque transversalmente con separadores longitudinales, reducirá la distancia B y, en consecuencia, tendrá un efecto importante sobre la magnitud de FSC
- **Embolsamiento:** los estanques deben mantenerse llenos al menos en un 90% para que se produzca el efecto de embolsar el líquido que contienen. Se produce embolsamiento se produce cuando un líquido choca contra la parte superior de un estanque y ello reduce los efectos de superficie libre. Por lo tanto, el embolsamiento es un evento físico deseable.
- **Estanques de combustible compensados:** algunos buques utilizan un sistema de combustible compensado con agua para minimizar el efecto de superficie libre. Este sistema reemplaza al combustible usado con agua salada para mantener el estanque siempre en su máximo nivel de llenado y evitar la formación de superficie libre. El agua salada es inmiscible con el aceite, por lo que no se mezclan. Por lo general, se utilizan al menos dos tanques para que el límite entre el agua salada y el aceite siempre permanece un estanque alejado del motor. El estanque de combustible intermedio se le denomina a menudo estanque de combustible limpio.
- **Estanques vacíos:** ¡Obviamente, los estanques vacíos no tienen FSC!

Las inundaciones a bordo de un buque pueden crear compartimentos con superficie libre y afectar su estabilidad. Las inundaciones pueden ser causadas por el esfuerzo de la extinción de incendios, así como por las perforaciones en el casco. Combatir incendios con una manguera puede aumentar el desplazamiento del buque y crear una superficie libre. Ambos causarán un aumento en el centro de gravedad, brazos más pequeños y menor estabilidad general.



Ejemplo 4.4 Una fragata de clase FFG-7 que desplaza 4092 LT (4160 TON) tiene un KG = 18.9 pies (5,8 m) y un KM = 22.49 pies (6,9 m). Tiene un estanque lleno de combustible con una densidad de 1.5924 lb-s²/ft⁴ (820,69 kg/m³) creando una superficie libre de 30 pies (9,1 m) de ancho y 60 pies (18,29 m) largo. El buque está flotando en agua salada que tiene una densidad de 1.9905 lb-s²/ft⁴ (1,025 ton/m³) ¿Cuál será la altura metacéntrica efectiva? (El ejercicio se realizará en ambos sistemas de unidades)

Desarrollo:

Sistema Gravitacional Inglés

$$\Delta_s = \rho g \nabla_s$$

$$\nabla_s = \frac{\Delta_s}{\rho g} = \frac{4092 \text{ LT} \times 2240 \text{ lb/LT}}{1,9905 \text{ lb-s}^2/\text{ft}^4 \times 32,17 \text{ ft/s}^2} = 143.143 \text{ ft}^3$$

$$i_t = \frac{lxb^3}{12} = \frac{60 \text{ ft} \times (30 \text{ ft})^3}{12} = 135.000 \text{ ft}^4$$

$$FSC = \frac{\rho_t i_t}{\rho_s \nabla_s}$$

$$FSC = \frac{1,5924 \text{ lb-s}^2/\text{ft}^4 \times 135.000 \text{ ft}^4}{1,9905 \text{ lb-s}^2/\text{ft}^4 \times 143.143 \text{ ft}^3} = 0,75 \text{ ft}$$

$$\overline{GM_{efect}} = \overline{KM} - \overline{KG} - \overline{FSC}$$

$$\overline{GM_{efect}} = 22,49 \text{ ft} - 18,9 \text{ ft} - 0,75 \text{ ft}$$

$$\overline{GM_{efect}} = 2,84 \text{ ft}$$

**Sistema Internacional de Unidades:**

$$\nabla_s = \frac{\Delta_s}{\rho g} = \frac{4160T}{1.025 \text{ T/m}^3} = 4.058,54 \text{ m}^3$$

$$i_t = \frac{lxb^3}{12} = \frac{18,29 \text{ m} \times (9,1 \text{ m})^3}{12} = 1.148,57 \text{ m}^4$$

$$FSC = \frac{\rho_t i_t}{\rho_s \nabla_s}$$

$$FSC = \frac{0,820,69 \text{ T/m}^3 \times 1.148,57 \text{ m}^4}{1.025 \text{ T/m}^3 \times 4.058,54 \text{ m}^3} = 0,23 \text{ m}$$

$$\overline{GM}_{effect} = \overline{KM} - \overline{KG} - \overline{FSC}$$

$$\overline{GM}_{effect} = 6,9 \text{ m} - 5,8 \text{ m} - 0,23 \text{ m}$$

$$\overline{GM}_{effect} = 0,87 \text{ m}$$

4.8.5. Efecto de Superficie Libre en GZ y en el Ángulo de Escora

Como ya se mencionó en esta sección, y como se muestra en la Figura 4.9, la superficie libre causa una reducción en el brazo de adrizamiento, una disminución en el rango de estabilidad y en la estabilidad dinámica de un buque. Bajo el efecto de superficie libre, la nave se comporta como si el centro de gravedad estuviese ubicado en el centro de gravedad virtual. Para calcular el brazo de adrizamiento efectivo de un buque afectado por superficie libre, el brazo de adrizamiento original debe corregirse por el aumento virtual en G causado por la superficie libre. Afortunadamente, ya tenemos la herramienta para hacer esta corrección... la corrección sinusoidal. Usando la Figura 4.9 como guía, el brazo de adrizamiento efectivo de se puede dar como:

$$\overline{G_1 Z_1} = \overline{GZ} - \overline{GG_v} \text{ sen } \phi \quad \text{ó} \quad \overline{G_1 Z_1} = \overline{GZ} - FSC \text{ sen } \phi$$

El peor de superficie libre es cuando el centro de gravedad transversal del buque no se encuentra en la línea de crujía. La sección 4.6 demostró que un cambio transversal en G resultó en una reducción en el brazo de adrizamiento y en la estabilidad general. Una superficie libre junto con G fuera de crujía es un caso especialmente adverso. No solo se ha disminuido la estabilidad general por la ubicación transversal de G, sino que además el aumento efectivo de G por el efecto de superficie libre reduce aún más los brazos de adrizamiento, el rango de estabilidad y la estabilidad dinámica. Para corregir la curva del brazo de adrizamiento para una superficie libre y un cambio transversal en G, primero se debe corregir GZ por el aumento virtual en G causado por la superficie libre usando la corrección de seno, y luego corregir GZ para la ubicación transversal de G usando la corrección coseno. Esta corrección está dada por la siguiente ecuación:

$$\overline{G_1 Z_1} = \overline{GZ} - FSC \text{ sen } \phi - TCG \cos \phi$$

Una superficie libre también incrementará el ángulo de escora. Recuerde del Capítulo 3 que el ángulo de escora debido a un cambio transversal en el centro de gravedad se



puede encontrar de la siguiente forma:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{TCG}{GM_T} \right)$$

Cuando existe Superficie Libre, el ángulo de escora puede encontrarse utilizando la siguiente expresión:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{TCG}{GM_{effect}} \right)$$

Ejemplo 4.5

La fragata FFG-7 del Ejemplo 4.4 tiene un brazo de adrizamiento de 1.33 pies (0,405 m) cuando alcanza un ángulo de inclinación de 20° y un KG = 18.9 pies. (5,8 m) ¿Cuál es el brazo de adrizamiento efectivo de la fragata con ese efecto de superficie libre presente? (El ejercicio se realizará en ambos sistemas de unidades)

Del ejemplo 4.4: KM = 22.49 pies (6,9 m), $GM_{efecto} = 2.84$ pies (0,87 m), FSC = 0.75 pies (0,23 m)

Desarrollo:

Sistema Gravitacional Inglés

$$\overline{GZ}_{effect} = \overline{GZ} - FSC \sin \phi - TCG \cos \phi$$

Si el centro de gravedad transversal de la unidad está ubicado a 0,5 pie a estribor de la línea de crujía, el cálculo del brazo de adrizamiento del buque y su ángulo de escora será:

$$\overline{GZ}_{effect} = \overline{GZ} - FSC \sin \phi - TCG \cos \phi$$

$$\overline{GZ}_{effect} = 1,33 \text{ ft} - (0,75 \text{ ft}) \times 20 - (0,5 \text{ ft}) \times \cos 20$$

$$\overline{GZ}_{effect} = 0,60 \text{ ft}$$

Nótese que el efecto de la ubicación transversal centro de gravedad en el brazo de adrizamiento del buque.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{TCG}{GM_{effect}} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{0,5 \text{ ft}}{2,84 \text{ ft}} \right)$$

$$\phi = 9,98^\circ$$

Sistema Internacional de Unidades:

Si el centro de gravedad transversal de la unidad está ubicado a 0,15 m a estribor de la línea de crujía, el cálculo del brazo de adrizamiento del buque y su ángulo de escora, será:

$$\overline{GZ}_{effect} = \overline{GZ} - FSC \sin \phi - TCG \cos \phi$$



$$\overline{GZ}_{effect} = 0,405 \text{ m} - (0,23 \text{ m})x \text{ sen}20 - (0,15 \text{ m})x \text{ cos } 20$$

$$\overline{GZ}_{effect} = 0,18 \text{ m}$$

Nótese que el efecto de la ubicación transversal centro de gravedad en el brazo de adrizamiento del buque.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{TCG}{GM_{effect}} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{0,5 \text{ ft}}{2,84 \text{ ft}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0,15 \text{ m}}{0,87 \text{ m}} \right)$$

$$\phi = 9,78^\circ$$

Las diferencias obtenidas en el valor de los grados se deben a aproximaciones realizadas en los cálculos.

4.8.6. Control de Averías y su efecto sobre la Estabilidad y la Boyantez

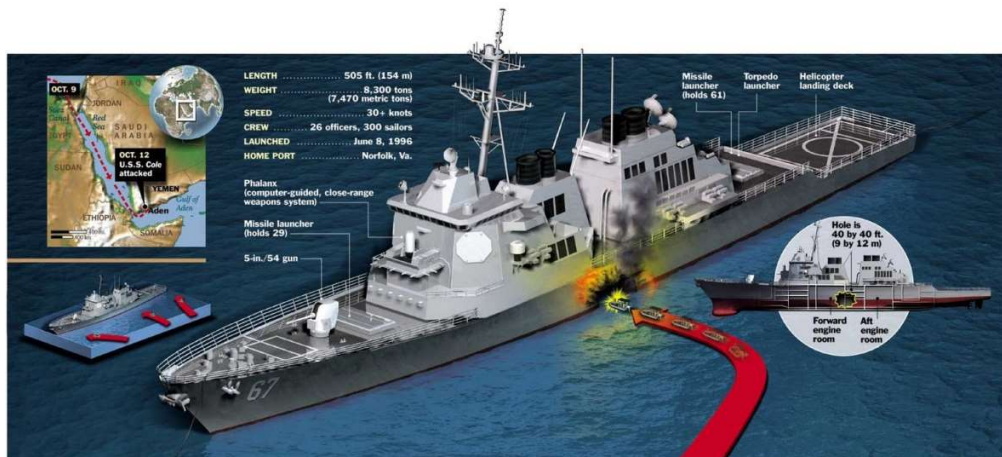
Las unidades navales y comerciales están diseñadas para resistir algún grado de daño accidental o como consecuencia de la acción de terceros. Las características de cada diseño para mitigar o prevenir averías, incluyen consideraciones de resistencia estructural (NO será visto en este curso), compartimentos estancos y los criterios de estabilidad y boyantez discutidos en este capítulo. Mantener estas características en condiciones óptimas requiere un estado constante de vigilancia por parte de la dotación del buque (Asistente de Control de Averías (DCA)) a cargo de la mayor parte del mantenimiento de estos sistemas y del entrenamiento de la tripulación embarcada para asegurar que una puerta estanca por la que acaba de transitar está cerrada y con sus perros trinca asegurados de acuerdo a la condición estanca imperante en el buque.

La experiencia indica que el 90% del esfuerzo de control de averías requerido para salvar a un buque dañado, se lleva a cabo antes de que ocurra la avería (capacitación, entrenamiento, simulacros, inspección y mantenimiento) y solo el 10 por ciento puede lograrse después de ocurrido el daño.

Sin embargo, una vez que la avería o el daño se han producido, los esfuerzos de la partida de control de averías son un aspecto vital que a menudo hace la diferencia entre que el buque se pierda o se salve:

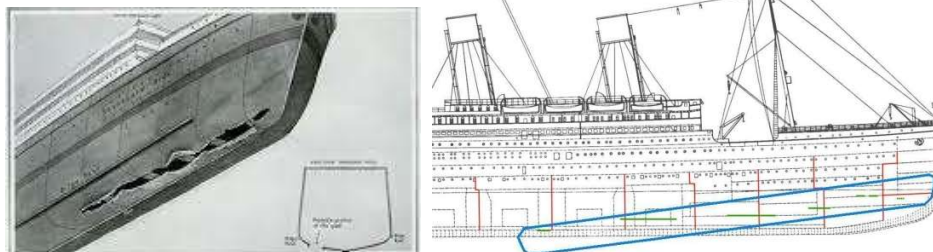
USS Cole (DDG-67), Golfo de Adén, Yemen, 2000

El USS Cole sufrió un gran agujero en su costado mientras se abastecía de combustible debido a un ataque terrorista. La explosión atravesó una de las salas de máquinas y generó grandes inundaciones, una escora severa y la pérdida de la energía eléctrica (No había cómo achicar las sentinas). Tres días de esfuerzos continuados de las partidas de control de averías mantuvieron al buque a flote. Los métodos de control de averías utilizados fueron desde el uso analítico de la contra inundación hasta las "cadenas de baldes" que achicaban el agua de los espacios inundados.



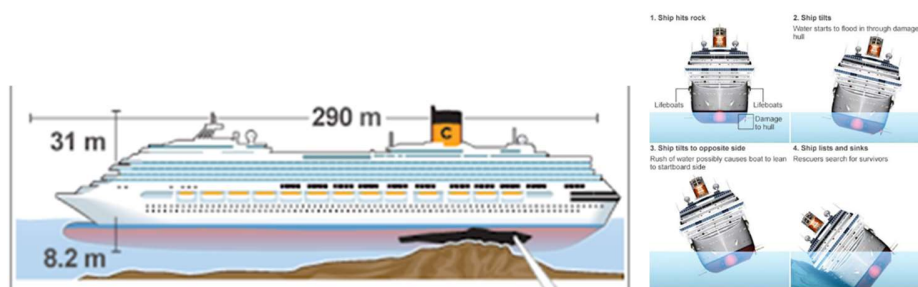
RMS Titanic, 1912

El buque que se consideraba como "prácticamente insumergible" con un estándar de dos/tres compartimentos inundables (podían inundarse de dos a tres compartimentos sin que el buque se hundiera) sufrió la rápida propagación de grietas en el revestimiento del casco que generó inundaciones progresivas en seis compartimentos estancos adyacentes. Esta avería hundiría al buque por sí sola; sin embargo, hay opiniones que estiman que podría haber permanecido más horas a flote si la tripulación hubiera tapado las grietas en el casco, que tenían solo unas pulgadas de ancho, con colchones u otro material. Estas horas adicionales podrían haber sido lo suficientemente adecuadas como para facilitar el despliegue de botes salvavidas de manera ordenada y permitir la llegada de ayuda.



BP Costa Concordia, 2012

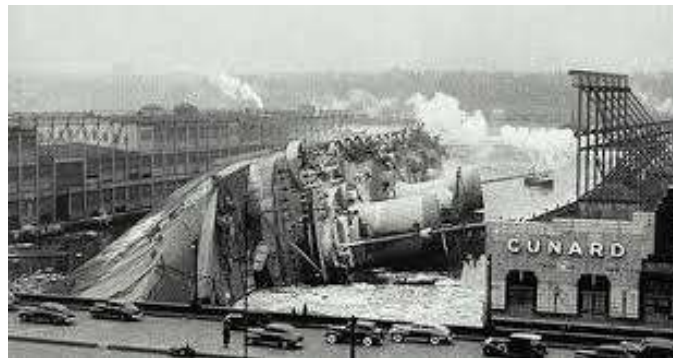
Casi 100 años después del Titanic y habiendo corregido e incorporado a bordo todas las enseñanzas aprendidas en su hundimiento, el Costa Concordia sufre un accidente similar contra la costa italiana en la que fallecen 32 personas, se rescataron más de 4.200 y no fue una tragedia mayor debido a que el buque quedó varado en aguas someras al costado de un acantilado de más de 100 metros de profundidad.





SS Normandie, 1942

Este buque se incendió en el puerto de la ciudad de Nueva York mientras se convertía de un transatlántico de lujo en un transporte de tropas para apoyar el esfuerzo de II Guerra Mundial. Los esfuerzos resultantes de extinción de incendios desde el casco causaron en ingreso de una cantidad masiva de agua en las cubiertas superiores y superficies libres grandes. Ello generó una escora pronunciada a babor que terminó con el volcamiento a un costado del muelle como consecuencia de la estabilidad negativa resultante por el cambio de peso vertical y del efecto de superficie libre. Esto se habría evitado si el esfuerzo de extinción de incendio hubiese sido considerado elementos de achique para retirar el agua ingresada por el personal de bomberos.





4.9 Altura Metacéntrica y las Curvas de Estabilidad Intacta

Hasta aquí, en este capítulo hemos considerado la estabilidad general de diferentes puntos de vista mediante la creación y análisis de las curvas de estabilidad estática intacta. Sin embargo, en el capítulo 3 usamos frecuentemente una magnitud llamada altura metacéntrica (GM); la distancia desde el centro de gravedad (G) y el metacentro (M). También se estableció que la altura metacéntrica es una medida de la estabilidad inicial de un buque o su capacidad de permanecer en posición adrizado a pequeños ángulos de escora. Claramente, debe haber algún vínculo entre GM y la curva de estabilidad estática intacta.

Recuerde que cuando G está por debajo de M, la altura metacéntrica se considera positiva y cuando G está por encima de M se considera negativa.

4.9.1. Relación entre el GM y la Curva del Brazo de Adrizamiento

La relación puede determinarse a partir del análisis de fuerzas de la Figura 4.13, que muestra a un buque con ángulos pequeños de inclinación.

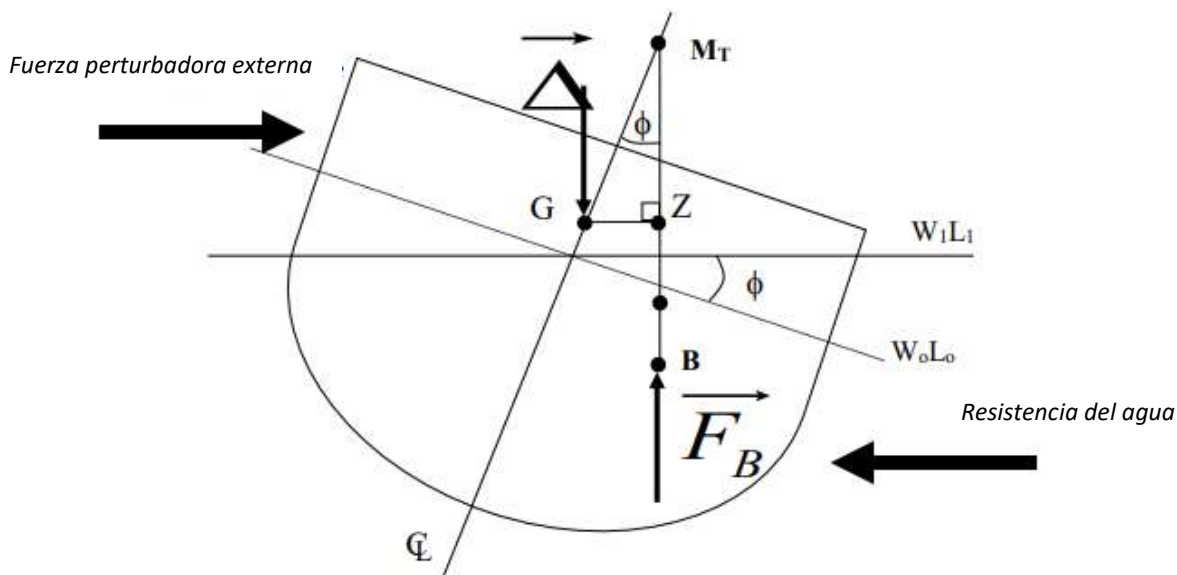


Figura 4.13 Un casco escorado a pequeños ángulos de inclinación

En ángulos pequeños, el triángulo rectángulo (G, Z, M) revela la siguiente ecuación para el brazo de adrizamiento.

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \phi$$

En el límite cuando ϕ se aproxima a 0 radianes, donde se define el metacentro, la expresión puede simplificarse a $GZ = GM \phi$ si el ángulo se da en radianes. Esto es porque

$$\sin \phi = \phi$$

cuando ϕ se mide en radianes.

Utilizando este concepto, para ángulos pequeños la ecuación anterior se convierte en:



$$\overline{GZ} = \overline{GM}\phi$$

$$\overline{GM} = \frac{\overline{GZ}}{\phi}$$

El ángulo más pequeño que se puede lograr es cero radianes = cero grados. Consecuentemente, la magnitud de GM es igual a la magnitud de la pendiente inicial de la Curva de Estabilidad Estática Intacta.

Por lo tanto, se ha establecido un vínculo entre GM y la curva del brazo de adrizamiento. Ahora examinaremos 3 condiciones de envío diferentes.

- Un buque con GM positivo
- Un buque con cero GM
- Un buque con GM negativo

Para encontrar la magnitud de la pendiente inicial en la curva de estabilidad estática intacta, construya dos líneas y use la intersección de esas dos líneas para determinar la magnitud del "eje y". La primera línea es una línea tangente a la pendiente a cero grados de inclinación. La curva de estabilidad estática debe pasar por cero para que esta técnica funcione. Si no pasa por cero, puede dibujar una línea paralela a la línea tangente a la pendiente que pasa por cero y continuar con el resto de los pasos. La segunda línea es una línea vertical en un radián o 57.3 grados. En el punto donde se cruzan estas dos líneas, lea horizontalmente hasta el "eje y" el valor del brazo de adrizamiento. Esta será la magnitud de GM.

4.9.2. Una Altura Metacéntrica Positiva

Esta es la condición de estabilidad del buque en la que en todos los ejemplos se ha trabajado hasta ahora. El centro de gravedad está bajo el metacentro, de modo que tan pronto como el buque se escora, comenzará a desarrollarse un brazo de adrizamiento.

La figura 4.14 muestra la configuración de los centroides para un buque con GM positivo y una curva de estabilidad estática intacta típica para esta configuración. Se encuentra en equilibrio estático y sin escora (siempre que TCG = 0 pies).

La condición de estabilidad es análoga a una bolita de cristal que se desplaza en un plato. Cuando existe una fuerza perturbadora que desplace a la bolita hacia la izquierda o hacia la derecha, ésta siempre regresará a su posición estable central.

Está en un estado de estabilidad positiva.

4.9.2.1 Buque brusco, buque blando y la magnitud de GM

La figura 4.14 también muestra la forma en que la magnitud de GM afecta la forma de la curva del brazo de adrizamiento.

- Un GM positivo grande crea una curva con una pendiente pronunciada que pasa por condición de buque adrizado a cero grados. Esto crea un buque "brusco", un buque que genera un brazo de adrizamiento muy grande y se recupera de la inclinación lateral rápidamente: el buque es muy estable.
- Un GM positivo pequeño crea una curva con una pendiente poco menos pronunciada en su condición de adrizado a cero grados. Esto crea un buque "blando" que desarrolla un brazo de adrizamiento pequeño y se recupera



lentamente de una escora: No es muy estable.

El tema de la brusquedad respecto de la suavidad tiene impacto en las aceleraciones que sufren la estructura, la dotación y la carga del buque frente fenómenos externos de la navegación como oleaje y viento.

4.9.3. Altura Metacéntrica Neutra (GM)

Un buque con altura metacéntrica cero es una condición de estabilidad muy rara. Ocurre cuando el centro de gravedad (G) coincide con el metacentro de la nave (M), la distancia entre los 2 puntos es cero.

La figura 4.14 muestra esta configuración. Está claro que en pequeños ángulos de inclinación, las líneas de acción del peso del buque y la fuerza de boyantez permanecen en alineación vertical. En consecuencia, no habrá un par de fuerza interno para regresar el buque a la condición de adrizado. En esta condición, si desaparece la fuerza perturbadora externa, ¡el buque permanecerá con ese último ángulo de inclinación o escora!

Esta condición puede ser representada por la curva del brazo de adrizamiento mostrada en la Figura 4.12. A ángulos pequeños de escora a babor y estribor, se desarrolla un brazo de adrizamiento igual a cero. La forma de esta curva también reafirma que la pendiente inicial es equivalente a la magnitud de GM.

$GM = 0$ significa Pendiente inicial = 0

significa línea horizontal

En consecuencia, hay una gama de ángulos de escora en que el buque está en equilibrio estático y no regresará a su condición normal de adrizado.

La condición es análoga a una bolita de cristal que rueda sobre una superficie plana. Un desplazamiento de la canica hacia la izquierda o hacia la derecha hará que la bolita en esta nueva posición y no regrese a su punto de origen.

Está en un estado de estabilidad neutra.

Una vez que el buque se inclina más allá de los ángulos pequeños de escora, el movimiento de M provoca un desalineamiento entre la fuerza de boyantez y el peso del buque, desarrollándose un brazo de adrizamiento; sin embargo, la curva será muy suave es muy suave y no regresará a la posición inicial de adrizado.

4.9.4. Altura Metacéntrica Negativa (GM)

Un buque con una altura metacéntrica negativa tiene su centro de gravedad (G) sobre su metacentro (M). Esta condición se puede crear cada vez que los movimientos de peso, su eliminación o agregado de pesos eleven significativamente G.

La figura 4.14 muestra a un buque en esta condición. Tan pronto como el buque tenga la más leve inclinación (más allá de cero grados), la desalineación de la fuerza de flotación y los vectores de peso tenderán a ayudar a la fuerza externa a continuar escorando al buque. En esta condición el buque es inicialmente inestable.

La curva del brazo de adrizamiento para esta condición también se muestra en la Figura 4.12. Observe que la pendiente de la curva es negativa a cero grados de inclinación, lo que respalda el valor negativo de GM. Esta condición es análoga a una bolita de cristal



que rueda sobre un recipiente volcado. Un desplazamiento de la canica hacia la izquierda o hacia la derecha hará que la canica continúe alejándose de su posición inicial.

Está en un estado de estabilidad negativa.

4.9.4.1 Balanceo inestable (Lolling)

En ángulos mayores de inclinación, el movimiento de M hace que se desarrolle un brazo de adrizamiento que se opone al movimiento de rolido o de balanceo. La curva de estabilidad estática intacta de la figura 4.12 muestra esta situación. Se crean dos ángulos de escora donde el buque alcanza el equilibrio estático, uno en babor y el otro a estribor. Cuando el buque se balancea en esta condición, oscilará entre estas 2 condiciones de equilibrio, creando un movimiento muy desagradable para los que están a bordo. Esto se llama balanceo o rolido inestable. Los 2 ángulos de escora en los que se asienta naturalmente el buque se denominan "ángulos de equilibrio inestable"

El balanceo inestable o "Lolling" es una situación inaceptable en el mar. A menudo, petroleros comerciales que están vacíos pueden tener su centro de gravedad lo suficientemente alto como para tener una altura metacéntrica negativa para que el buque se tumbe en un ángulo específico indistintamente a babor o a estribor (es como si sufriese una caída hacia una banda). Para corregir este defecto de estabilidad, el buque puede lastrarse para disminuir la altura del centro de gravedad y obtener un momento adrizante a pequeños ángulos de escora.

Los buques navales están diseñados para que no se produzca este efecto, por lo que si llega a ocurrir, indica que algo está mal operacionalmente y que se debe determinar la causa. Si un buque con una altura metacéntrica negativa no se está en condición de balance inestable, al menos tendrá una escora inicial.

Para aclarar los términos ingleses de "HEEL – LIST – LOLL" es necesario tener presente que en el idioma español existe un único término para definir la inclinación transversal de los buques y se llama "escora"; sin embargo, la misma puede deberse a diferentes causas que si son tomadas en cuenta en la lengua inglesa.¹

1. Heel:

Es la escora producida por una fuerza externa como viento u ola. La posición de equilibrio del buque es estar adrizado. Por un efecto externo sufre una escora, pero cuando la misma desaparece el buque recupera su condición de adrizado. Podemos definirla como situación "verde".

2. List:

El buque tiene una escora permanente hacia una banda debido a que su centro de gravedad no se encuentra verticalmente sobre crujía. Si una fuerza externa actúa sobre él, el buque rolará pero cuando la misma deje de ejercer efecto, volverá a su escora inicial. Muchas veces se escora intencionalmente un buque para permitir un buen drenaje de un estanque durante, por ejemplo, un lavado de este. Esta podría ser una situación amarilla.

¹<http://www.maniobradebuques.com/articulosTecnicos/articulo81.html>



3. Loll:

Este término es usado para describir el estado de un buque que es inestable cuando se encuentra adrizado y, como resultado toma un ángulo de escora indistintamente hacia una banda o hacia la otra cuando una fuerza externa actúa sobre él. Es causada generalmente por una gran área de superficie libre de agua dentro del casco, como por ejemplo en un buque con compartimentos inundados, pero también puede ser causada por el exceso de peso por alto o el izamiento de grandes pesos mediante una pluma o grúa del buque. Es una situación de alto riesgo de la cual se debe evitar o salir de ella lo más rápidamente posible.

Un caso práctico fue el del ferry “Herald of Free Enterprise” el 6 de marzo de 1987. El buque zarpó con su compuerta de proa abierta y por efecto encabuzamiento, aumentó su calado de proa inundándose el garaje a través de una abertura de 30 m² calculándose que ingresaron al mismo 2.000 t de agua en 30 segundos lo que le provocó una escora de 95° quedando recostado sobre un banco de arena.



Altura metacéntrica (GM)	Diagrama de vectores en una sección en corte	Curva de Estabilidad Inicial Estática Intacta GZ v/s ϕ	Analogía con una bolita de cristal
Positiva		Pendiente = $GM (+)$ 	



Neutral		Pendiente = $GM = 0$	
Negativa		Pendiente = $GM (-)$	

Figura 4.14 Alturas Metacéntricas Positivas, Neutras y Negativas



4.9.5. Resumen

Es de vital importancia recordar que la estabilidad general de un buque nunca debe evaluarse solo por el signo y la magnitud de la altura metacéntrica (GM). Las medidas generales de estabilidad estática se analizaron en la Sección 4.4. y ellas fueron:

- Rango de estabilidad
- Estabilidad dinámica
- Brazo de adrizamiento máximo
- Máximo momento de adrizamiento
- Ángulo en el que se produce el momento de adrizamiento máximo.

Es incorrecto usar GM como único criterio para evaluar la estabilidad de un buque. La altura metacéntrica solo indica si el buque permanecerá adrizado (en posición vertical) a pequeños ángulos de escora. Otros indicadores de la estabilidad incluyen el KG, y calados respecto del calado máximo autorizado o de diseño.

Para garantizar una estabilidad adecuada de un buque en todas sus condiciones de carga, es necesario que estén especificados todos los límites como el KG máximo, el GM mínimo, el calado máximo (desplazamiento) y el rango mínimo de estabilidad. La ubicación de G y el desplazamiento de un buque respecto de su calado máximo permitido pueden colocarlo en una de las siguientes cuatro distintas categorías de estabilidad. Estas categorías determinarán, para cada navío, la cantidad de peso que se le puede agregar o quitar, y la ubicación en la que puede ocurrir dicha adición o eliminación de peso.

- Estado 1:* El buque tiene un peso y márgenes de estabilidad adecuados por lo que un cambio de peso a cualquier altura es generalmente aceptable.
- Estado 2:* El buque está cerca de los límites máximos de calado y de estabilidad (KG). Cualquier aumento de peso o aumento en la altura de G es inaceptable.
- Estado 3:* *El buque está muy cerca de su límite de estabilidad, pero tiene un margen adecuado de carga. Si ocurriese un cambio de peso que generase un cambio del valor de KG por encima del permitido, se puede corregir con la adición de lastre sólido (plomo u hormigón) en la parte baja del casco.*
- Estado 4:* *Existe un margen de estabilidad adecuado, pero el buque está saliendo del puerto muy cerca de su calado máximo limitante. Esta condición generalmente se aplica a petroleros y lanchas de desembarco anfibia.*



PROBLEMAS – CAPÍTULO 4

Sección 4.2 El Brazo de adrizamiento:

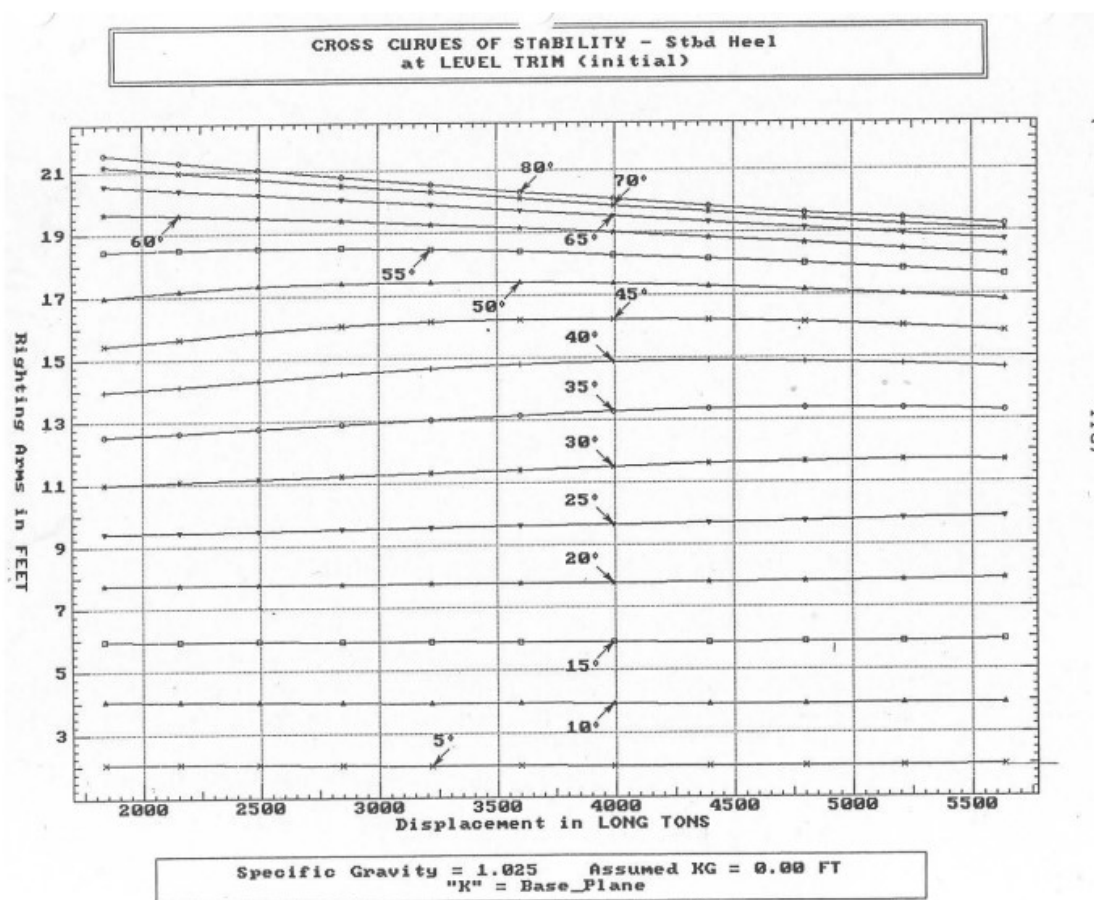
1. Describa brevemente por qué un buque que tiene estabilidad positiva regresará a su condición de equilibrio estático después de haber sido escorado por un momento perturbador externo momentáneo. Use un diagrama para su explicación.
2. Una nave tiene un volumen sumergido de 3.170 m^3 y un brazo de adrizamiento de 0,6 metros cuando se escora 15 grados. Calcule su momento de adrizamiento al inclinarse a éste ángulo.
3. Dibuje un diagrama mostrando a un buque estable escorándose hacia babor.

Sección 4.3 La Curva de Estabilidad Estática Intacta:

4. Utilice los siguientes datos para graficar la curva de estabilidad estática intacta de una nave para escores a estribor solamente:
 - a. Los datos corresponden a un buque que desplaza 3660 toneladas con un KG de 5,5 metros. Recuerde colocar los títulos correctamente a su gráfico y ejes de referencia.

Ángulo de escora, ϕ (grados)	0	20	40	60	80	100
Brazo de Adrizamiento, GZ (metros)	0,0	0,37	0,85	1,25	0,82	0,0

 - b. Haga un esquema para mostrar una sección del buque escorado 30 grados hacia estribor. Calcule el momento de adrizamiento que se genera en esta condición.
 - c. Al observar su boceto, ¿qué sucedería con la magnitud del momento de adrizamiento calculado en (b), si el centro de gravedad se elevara de modo que KG aumentara a 5,64 metros?
5. Usando las curvas cruzadas de una fragata tipo Adelaida (FFG7) que se adjunta en esta pregunta, grafique su curva de estabilidad estática intacta para un desplazamiento de 3500 LT con $KG = 0$ pies.



Sección 4.4 Características de Estabilidad General:

6. Grafique la siguiente curva de estabilidad estática intacta para escoras a estribor:

a. Para un buque con las siguientes características de estabilidad general

Características de estabilidad general	Valor
Rango de Estabilidad	0 a 90 °
Brazo de Adrizamiento Máximo	1,16 m
Ángulo del Brazo de Adrizamiento Máximo	50°
Brazo de Adrizamiento a 30° de escora	0,61 m

b. Sobre el gráfico realizado en el punto anterior, dibuje la curva de estabilidad estática intacta para un buque con brazos de adrizamiento más duros. ¿Qué buque es más estable?

c. ¿Cómo se puede calcular la estabilidad dinámica del gráfico realizado en la parte a.



anterior?

Sección 4.5 Corrección por Seno:

7. Un buque de cabotaje tiene un desplazamiento de 8.500 toneladas y un KG de 6,55 metros cuando está escorado a 20°
- Utilice un diagrama adecuado para derivar una ecuación que le permita calcular la magnitud de un nuevo brazo de adrizamiento si el valor del KG aumentase.
 - Utilizando la ecuación que planteó y los datos de enunciado, calcule el el nuevo brazo de adrizamiento a 20° de escora si el KG del buque aumentó a 6,5 metros.
8. Utilizando las curvas cruzadas que se le entregan, corrija la curva de estabilidad estática intacta para un buque de 4060 toneladas y para su verdadero KG = 5,8 metros. Trace su curva de estabilidad estática intacta.
- ¿Cuál es el momento máximo de adrizamiento?
 - ¿Cuál es el rango de estabilidad?
 - ¿Cuál es el ángulo de $GZ_{\max}$?
 - ¿Qué le sucede al buque si se aplica un momento mayor que el Momento de Adrizamiento Máximo?
 - ¿Qué ocurrirá si la nave se escora a un ángulo mayor al del rango de estabilidad?

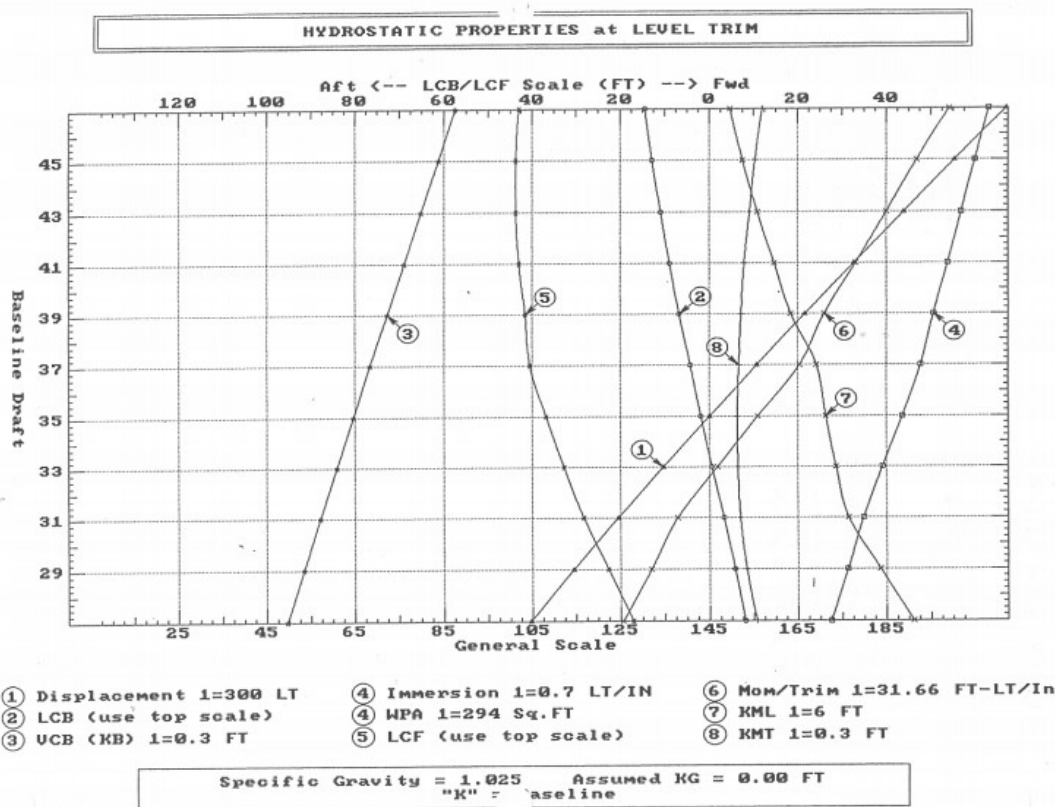
Curvas Cruzadas de Estabilidad - desplazamiento 4060 ton					
Gravedad específica 1.025, KG 0,0 metros y K en la quilla del buque					
ϕ°	GZ_0 (m)	ϕ°	GZ_0 (m)	ϕ°	GZ_0 (m)
0	0	30	3,5	60	5,8
5	0,6	35	4,1	65	6,0
10	1,2	40	4,5	70	6,1
15	1,8	45	4,9	80	6,2
20	2,4	50	5,3		
25	2,9	55	5,6		

9. Un buque tiene un desplazamiento de 6.350 toneladas y un KG igual a 5,4 metros. En esta condición el buque desarrolla un brazo de adrizamiento de 1,7 metros cuando se escora a 30° .
- Dibuje un diagrama que muestre el efecto que tiene una disminución de la altura del Centro de Gravedad sobre el Brazo de Adrizamiento. Muestre en su diagrama la posición original y nueva del Centro de Gravedad, Metacentro, ángulo de escora, GZ inicial y final y los vectores del desplazamiento y de la Fuerza de Boyantez.
 - Asumiendo que el movimiento de un peso disminuye la altura del Centro de Gravedad del buque en 0,5 metros, calcule el brazo de adrizamiento al ángulo de escora de 30° después de que el peso se movió.
10. Un petrolero auxiliar (AOE-6) está preparándose para realizar un reabastecimiento e la mar. Antes de la maniobra se encuentra navegando adrizado con un calado medio de 38,5 ft. Su



Centro de Gravedad está ubicado a 37 ft sobre la quilla y su eslora entre perpendiculares es de 717 ft.

Cuando finaliza la entrega de combustible, de víveres y de pertrechos, ha descargado 10.000 LT de carga que tenía un KG en la línea de crujía y 25 ft sobre la quilla.



Utilizando las curvas de forma entregadas, determine lo siguiente:

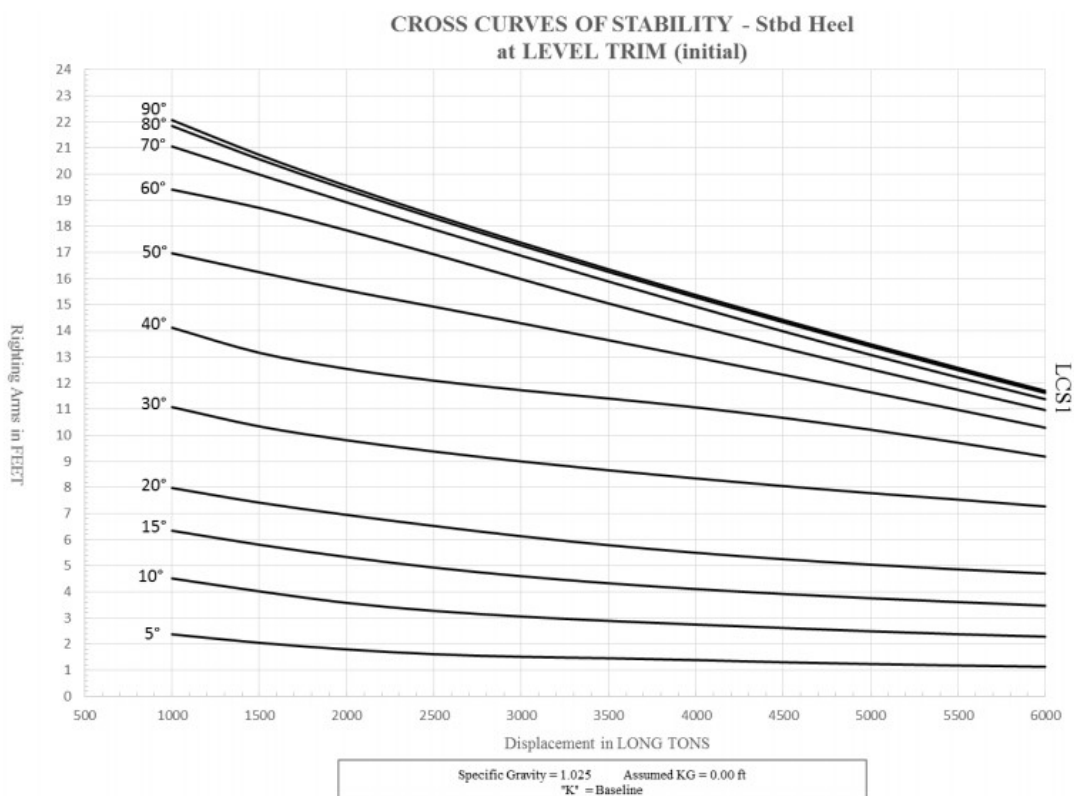
- Desplazamiento y calado del buque después de haber entregado la carga.
- KG y posición de TCG una vez completada la maniobra de reabastecimiento.
- Calcule y trace las curvas del brazo de adrizamiento para las condiciones iniciales y finales de la nave. Haga el gráfico sólo para los ángulos de escora a estribor. Nota: se recomienda el uso de un programa de hoja de cálculo.
- A partir de sus resultados de la parte (c), complete la siguiente tabla y comente sobre el efecto de del reaprovisionamiento en la estabilidad.

Parámetro	Antes de descargar	Después la descarga
Desplazamiento, Δ (LT)		
Centro de Gravedad, KG (ft)		
Brazo Adrizamiento Máx, $GZ_{m\acute{a}x}$ (ft)		
Ángulo del $GZ_{m\acute{a}x}$ (grados)		
Rango de Estabilidad (grados)		



Sección 4.6 Corrección por Coseno:

11. Un buque tiene un desplazamiento de 7370 toneladas y un KG de 7,2 metros. En esta condición tiene las siguientes características:
- Rango de Estabilidad $0^\circ - 85^\circ$
Máximo brazo de Adrizamiento 1,6 metros con una escora de 50°
- ¿Qué ocurre con estas características si el centro de gravedad sube?
 - ¿Qué ocurre con estas características si el centro de gravedad baja?
 - ¿Qué ocurre con estas características si el centro de gravedad tiene un desplazamiento transversal, pero mantiene la distancia vertical desde la quilla?
12. Un buque con un desplazamiento de 8484 toneladas, con un KG de 6,6 metros y un TCG de 0 metros, genera un brazo de adrizamiento de 0,64 metros cuando se escora a 20°
- Utilizando un esquema gráfico adecuado derive la ecuación para calcular la magnitud del nuevo brazo de adrizamiento si su centro de gravedad se mueve transversalmente.
 - Utilizando la ecuación de a. y los datos del enunciado, calcule el valor del nuevo brazo de adrizamiento a 20° de escora si el CG se mueve transversalmente 0,15 metros.
13. Un buque de Combate del Litoral de la USN LCS-1: de la Clase Freedom tiene un desplazamiento de 3000 LT y un KG = 14.0 pies tiene las siguientes curvas de estabilidad cruzadas:



- Utilizando las curvas cruzadas, trace la curva de estabilidad estática intacta para escoras a estribor cuando la nave tiene una TCG = 0 pies. En los mismos ejes, trace una



- segunda curva para el LCS1 en la misma condición, pero con TCG = 1,0 pie.
- Compare las dos curvas. ¿En qué condición es más estable el buque?
 - ¿Cuál es el ángulo de escora permanente del buque cuando TCG = 1,0 pies?
14. Una Fragata tipo Adelaida está navegando con un desplazamiento de 3990 LT. Tiene un KM = 22.8 pies, KG = 19.3 pies su Lpp = 408 pies. Transfiere 9000 galones (28 LT) de combustible desde un estanque de almacenamiento ubicado en la crujía y a 6 pies sobre la quilla, a un estanque de servicio ubicado a 6 pies sobre la quilla, pero a 15 a babor de la línea de crujía.
- Determine el TCG del buque después de transferir el combustible.
 - ¿Cuál es el ángulo de escora del buque después de la transferencia de combustible?
 - Dibuje un diagrama esquemático del buque escorándose a babor, mostrando el él las posiciones iniciales y finales de G y B (G_0, G_f, B_0, B_f), los brazos de adrizamiento iniciales y finales (G_0Z_0, G_fZ_f), metacentro (M), ángulo de escora (ϕ) y vectores de desplazamiento y fuerza de boyantez.
 - Utilizando las curvas cruzadas de la pregunta número 5 (FFG-7), calcule y grafique para ambas bandas (babor y estribor), los ángulos de escora y la curva de los GZ antes y después de haber transferido el combustible. Se recomienda el uso de un programa de hoja de cálculo para dibujar las curvas.

Sección 4.7 Estabilidad Dañada:

15. Un compartimento tiene un volumen de 17 m³ (600 pies³) y una permeabilidad del 90%. ¿Cuántas toneladas (LT) de agua dulce retendría si estuviera completamente lleno?
 $(\rho_{\text{Agua dulce}} = 1 \text{ t/m}^3)$
16. El compartimento descrito en la pregunta 15 anterior forma parte integral de un buque que desplaza 6000LT con KG = 22 pies y TCG = 0 pies. Si el compartimento se inunda en un 80% de su volumen con agua dulce y tiene su centro de gravedad a 12 pies de la línea de crujía y 6 pies por sobre la quilla, calcule el KG y TCG en condición de buque dañado.
 $(\rho_{\text{dulce}} = 1,94 \text{ lb-s}^2/\text{ft}^4 \text{ ó } 1,94 \text{ slug/ft}^3, 1 \text{ LT} = 2240 \text{ lb})$
17. Si el mismo compartimento descrito en las preguntas 15 y 16 tiene un centro de gravedad alineado verticalmente con el centro de flotación, calcule el cambio de asiento que generará esta inundación.
18. Un destructor de la clase DDG-51 está navegando por el Atlántico Norte en invierno cuando se encuentra con una tormenta severa que cubre las cubiertas externas, la superestructura y los mástiles con una capa de hielo de 1,5 pulgadas de espesor. Antes de la tormenta, estaba adrizado con un calado de 20.5 pies y un KG = 21.3 pies. Su Lpp = 465 pies.

El hielo tiene las siguientes características:

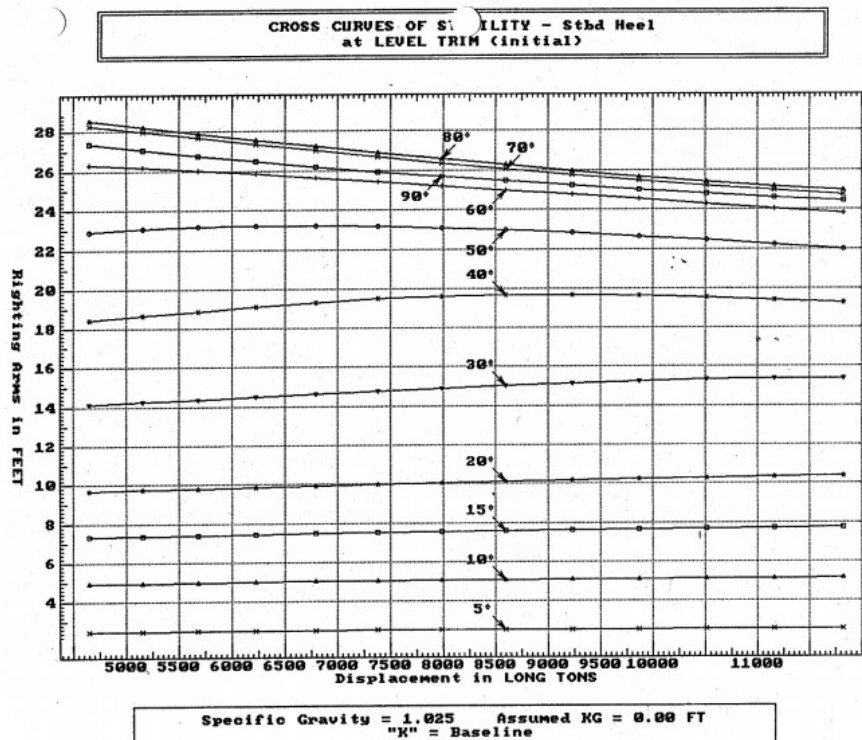
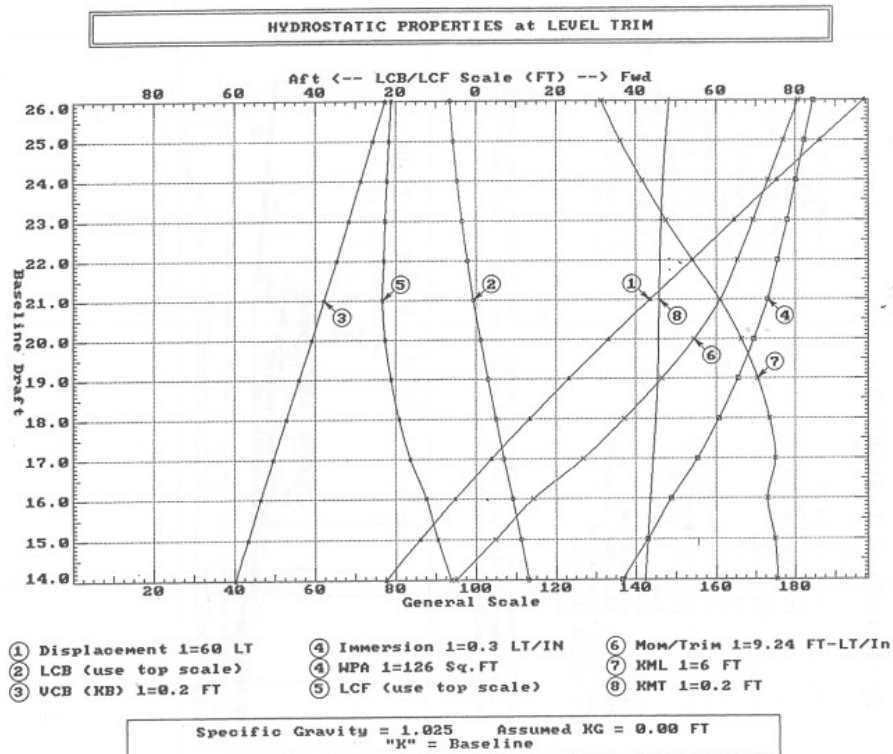
$$\rho_{\text{hiel}} = 56 \text{ lb/ft}^3$$

$$kg = 68 \text{ ft}$$

$$\text{Área que cubrió el hielo} = 71.250 \text{ ft}^2 \text{ tcg} = 0 \text{ ft}$$

$$\text{Espesor del hielo} = 1,5 \text{ pulgadas}$$

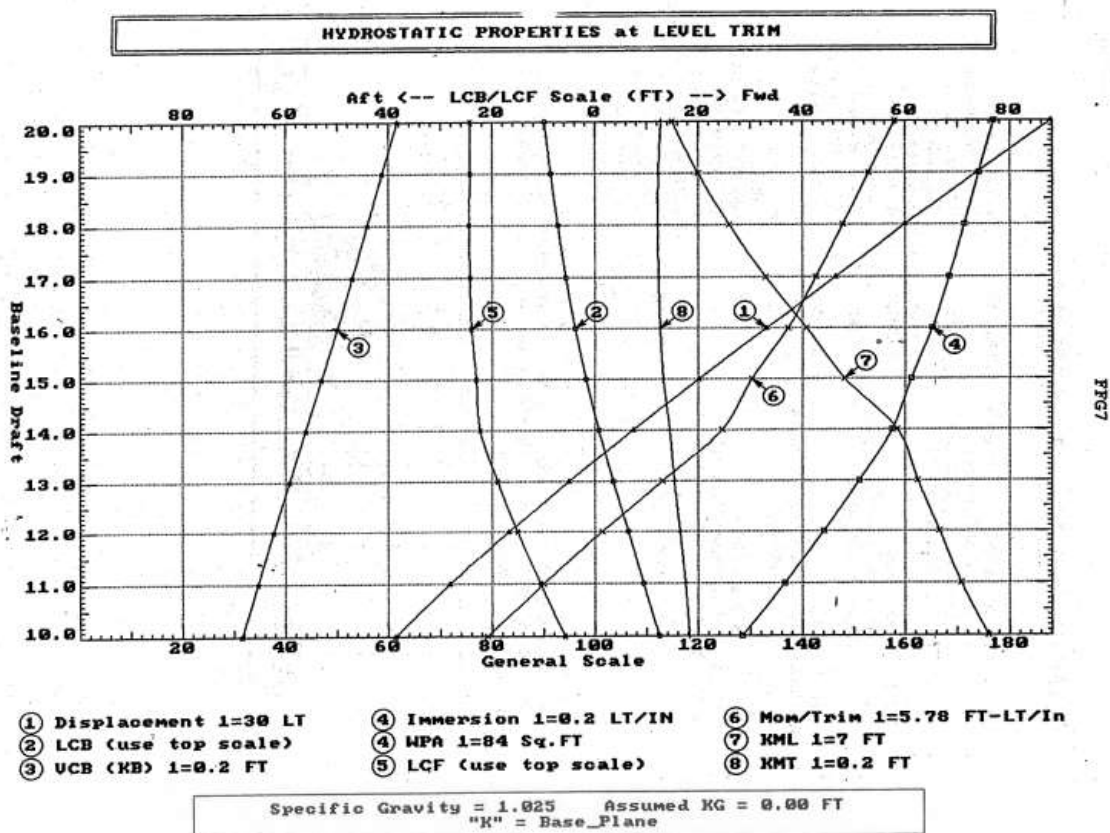
$$l_{cg} = 75 \text{ ft a proa de la } \text{☞}$$



Utilizando las Curvas de estabilidad de Forma y Cruzadas, determinar lo siguiente:



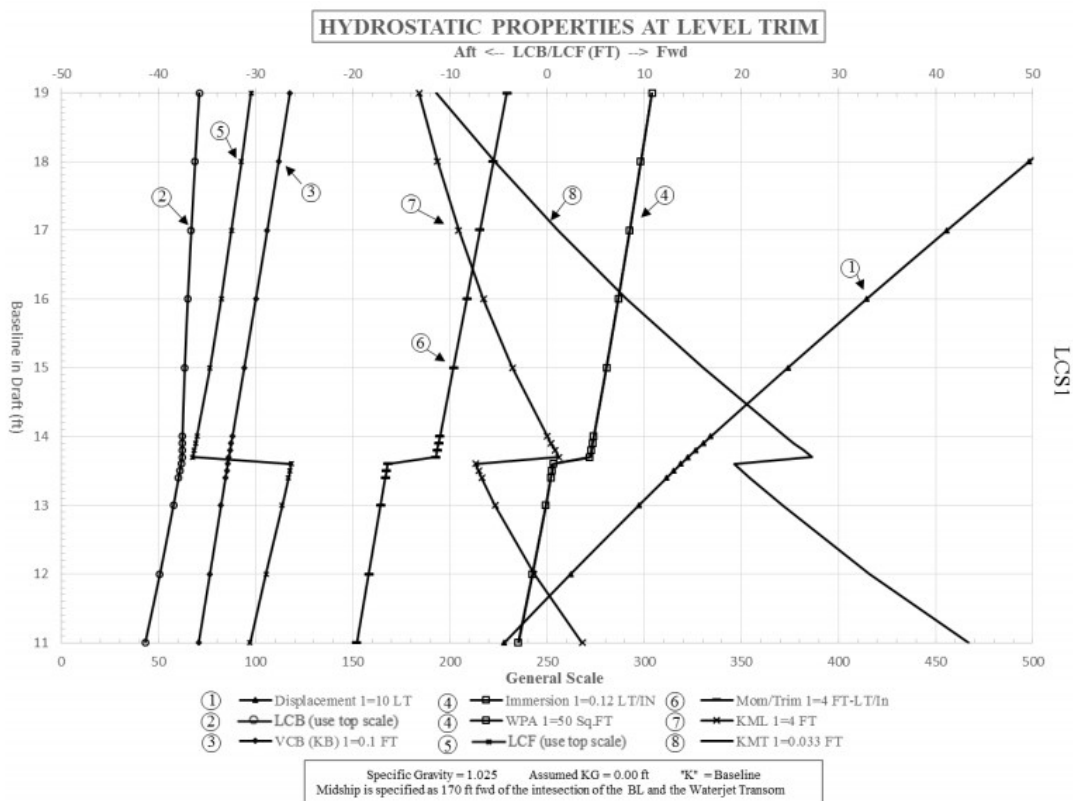
- a. Peso de hielo acumulado a bordo.
 - b. KG del buque después de la tormenta
 - c. Calados de proa, popa y medio después de la tormenta.
 - d. Altura metacéntrica antes y después de la tormenta.
 - e. Calcule y trace la curva del brazo de adrizamiento (solo para ángulos de inclinación de estribor) antes y después de la tormenta. Se recomienda el uso de una planilla de cálculos.
 - f. Indique los efectos de la acumulación de hielo en la estabilidad general del buque. Incluya los efectos del hielo sobre el cambio de asiento, altura metacéntrica, rango de estabilidad, el brazo de adrizamiento máximo, la estabilidad dinámica y respecto de la brusquedad o suavidad del buque para regresar a la posición de adrizado
19. Una fragata de la clase Adelaida (FFG-7) está en el sur cuando un volcán cercano hace erupción, cubriendo el buque con cenizas volcánicas húmedas. Antes de la erupción, la fragata tenía un calado de 16 pies, su centro de gravedad ubicado en la línea de crujía, a 19.5 pies sobre la quilla. Su eslora entre perpendiculares es $L_{pp} = 408$ pies.
- La ceniza húmeda tiene una densidad de 125 lb/ft^3 y cubre un área de cubierta de 15.260 ft^2 con un espesor uniforme de 6 pulgadas. Se supone que la ceniza tiene su centro de gravedad ubicado a 37 pies por encima de la quilla, a 1,5 pies de estribor de la línea de crujía y a 24 pies a popa de la cuaderna maestra.
- Utilizando las curvas de forma y curvas cruzadas (Las curvas cruzadas fueron entregadas en la pregunta número 5 y las de forma son las que se muestran a continuación), determine lo siguiente:
- a. Peso de la ceniza volcánica acumulada a bordo.
 - b. Ubicación de G después de la erupción.
 - c. Calado del buque después de la erupción.
 - d. Ángulo de escora.
 - e. Altura metacéntrica antes y después de la erupción.
 - f. Calcule y grafique la curva de GZ para ángulos de inclinación a estribor, antes y después de la erupción. Se recomienda el uso de un computador.



20. El portaaviones USS NIMITZ (CVN-68) se encuentra navegando en el Atlántico Norte en pleno invierno. Una tormenta severa cubre la cubierta de vuelo a una profundidad uniforme de 3 pies con una mezcla de nieve y hielo. La cubierta de vuelo tiene un área de 196,000 pies², y la cubierta de vuelo está ubicada a 82 pies sobre la quilla. Antes de la tormenta, la nave estaba adrizada, con un calado de 37 pies, KG = 37.5 pies, Lpp = 1040 pies.
- La nieve y el hielo tienen una densidad combinada de 33 lb/ft³ y su centro de gravedad se encuentra en la línea central de crujía y en la cuaderna maestra.
- Usando las curvas de forma y las curvas transversales de estabilidad, determine lo siguiente:
- Peso de nieve y hielo en la cubierta de vuelo.
 - Ubicación de G después de la tormenta.
 - Los calados de proa y popa después de la acumulación de hielo.
 - Calcule y grafique la curva del brazo de adrizamiento (solo para ángulos de inclinación de estribor), antes y después de la tormenta.
 - ¿Cómo afectó la acumulación de nieve y hielo a la estabilidad del buque? Desarrolle su respuesta en términos de altura metacéntrica, brazo de adrizamiento, rango de estabilidad, estabilidad dinámica, etc.
21. Un buque tipo LCS1 sufre una gran inundación en la proa, con lo que el departamento de 7800 pies³ afectado se inunda completamente (es decir, sin superficie libre). El centro de gravedad de la inundación se encuentra a 142 pies a proa de la cuaderna maestra, a 8 pies sobre la quilla y a 1 pie a estribor de la línea de crujía. Antes de la inundación, el buque



estaba adrizado con un calado de 14 pies, KG = 12 pies. Su Lpp es de 324 pies.



Usando las curvas de forma anterior y las curvas cruzadas entregadas en aa pregunta 13, determine lo siguiente:

- Peso del agua de inundación.
 - KG y TCG del buque después de producida la inundación.
 - Ángulo de escora
 - Calados medio, de proa y de popa después de la inundación.
 - Calcule y grafique la curva del brazo de adrizamiento antes y después de la inundación. Se recomienda el uso de una computadora.
 - ¿Qué efecto tiene la inundación en la estabilidad y en su comportamiento para recuperarse de las escoras?
22. En el método análisis de boyantez perdida, ¿cuáles de los siguientes cambian después del daño?
- Desplazamiento.
 - KG
 - LCB
 - KB



Sección 4.7 Estabilidad Dañada:

23. ¿Cómo afecta la superficie libre de fluido dentro un estanque rectangular a la estabilidad general de un buque? Dibuje un diagrama para mostrar lo que sucede efectivamente, lo que ocurre con el centro de gravedad y la altura metacéntrica. Asegúrese de mostrar el efecto de la superficie libre.
24. Describa 2 formas en que se puede reducir el efecto de superficie libre.
25. Una fragata de la clase Adelaida (FFG-7) que desplaza 4065 toneladas tiene un KG = 5,6 metros y un KM = 6,9 metros. Hay un estanque lleno de combustible con una densidad de $0,825 \text{ t/m}^3$ creando una superficie libre de 9,8 metros de ancho y 16,2 metros de largo. El buque está flotando en agua salada con una densidad de 1.025 t/m^3 . ¿Cuál es la altura metacéntrica efectiva?
26. Un buque con un desplazamiento de 12.400 toneladas tiene un KG a 6,9 metros en la línea de crujía. A este desplazamiento, el buque tiene $KM_T = 11,3$ metros. Se genera una superficie libre en un estanque de combustible ($\rho_{\text{comb}} = 0,833 \text{ t/m}^3$). El estanque tiene 10,7 metros de largo, 12,2 metros de ancho y 4,6 metros de profundidad.
- Calcule la altura metacéntrica efectiva si el centro del estanque se encuentra en la línea de crujía y 4,6 metros sobre la quilla.
 - Calcule la altura metacéntrica efectiva si el centro del estanque se encuentra a 4,6 metros sobre la quilla y a 3 metros a estribor de la línea de crujía.
27. Una fragata de la clase FFG-7 estando adrizada, calando 16,2 pies, con un KG = 19,1 pies, $L_{pp} = 408$ pies, sufre un gran incendio en uno de sus departamentos interiores. Mientras se combate el fuego, la partida de control de averías llena el departamento al 50% con agua salada. El departamento tiene las siguientes características:
- | | |
|---------------------|---|
| Longitud = 45 pies | kg = 46 pies |
| Ancho = 35 pies | tcg = 4 pies estribor de la línea de crujía |
| Altura = 10 pies | lcg = 47 pies a proa de la cuaderna maestra |
| Permeabilidad = 90% | |
- Usando las curvas cruzadas de estabilidad y las curvas de forma, determine lo siguiente: (las curvas son las mismas utilizadas en los ejercicios anteriores para una FFG-7)
- Peso del agua acumulada dentro del departamento al combatir el incendio.
 - Ubicación del Centro de Gravedad de la Fragata después del incendio.
 - Calados de proa, popa y medios después del incendio.
 - Altura metacéntrica efectiva del buque después del incendio.
 - Utilizando la posición efectiva del centro de gravedad vertical, determine el ángulo de escora con que quedó el buque después del incendio.
 - Calcule y grafique la curva del brazo de adrizamiento de la nave, para los ángulos de inclinación a ambas bandas, antes y después del incendio. Al calcular la curva GZ después del incendio, use la posición efectiva del centro de gravedad. Se recomienda el uso de una planilla de cálculos.
 - La Partida de Control de Averías detecta que la estabilidad se vió afectada y propone contrarrestar las inundaciones llenando un estanque de lastre de la banda de babor con agua salada al 75%. El estanque de lastre se encuentra a 7,5 pies por sobre la quilla, 12 pies a babor de la línea de crujía y 98 pies a popa de la cuaderna maestra.



El tanque tiene 20 pies de largo, 20 pies de ancho y 15 pies de alto. ¿Considera Ud. que la proposición de la partida de Control de Averías es aceptable? Justifique su respuesta ya sea que la apoya o la rechaza.

Sección 4.9 Altura metacéntrica:

28. Un petrolero tipo ULC se está preparando para zarpar hacia el Golfo Pérsico para cargar petróleo crudo. El buque está vacío y flotando adrizado con un calado de 4,88 metros. En esta condición, el centro de gravedad se encuentra a 10,06 metros sobre la quilla. El buque tiene 260 metros de eslora, una manga de 36,6 metros, y cuando está completamente cargado tiene un calado de 21 metros. Con el calado de 4,88 metros tiene los siguientes parámetros hidrostáticos:

$\Delta = 39.120$ toneladas	MT 1cm = 472,56 t - m/cm
KB = 2,6 metros	TCI = 82,56 t/cm
KM _T = 12,2 metros	LCF = 3,1 metros a popa de 

Para mejorar la estabilidad del petrolero y disminuir la altura del centro de gravedad, el oficial de estiba recomienda llenar el tanque de carga más pequeño al 50% con lastre de agua salada. El tanque de carga tiene las siguientes características:

Longitud = 30,5 metros	l _{cg} en LCF
Ancho = 36,6 metros	t _{cg} en la crujía
Altura = 18,3 metros	kg de lastre = 4,6 metros
Permeabilidad = 99%	

- Determine el peso del agua que se embarcará como lastre.
 - Determine el centro de gravedad del buque en la condición de lastre.
 - Asumiendo que los estanques del buque son de banda a banda, que los costados son verticales y perpendiculares al plano de flotación, y que TPI y MT1cm no cambian, calcule el calado medio del buque en la condición de lastre.
 - Calcule la altura metacéntrica efectiva del buque después de lastrarse y alcanzar un calado medio de 6,1 metros y un KM = 12,8 metros.
 - ¿Qué efecto genera la superficie libre en la estabilidad del buque? ¿Es buena la recomendación del oficial de estiba? Explique su respuesta en términos de altura metacéntrica, estabilidad dinámica y rango de estabilidad. Use un bosquejo de la curva GZ antes y después del lastre para facilitar la explicación de su respuesta.
 - ¿Qué se podría hacerse para lograr el objetivo del oficial de estiba para mejorar la estabilidad sobre la condición de carga vacía?
29. Defina buque suave y buque brusco. ¿Cómo se relaciona la altura metacéntrica con la condición de buque suave, buque brusco la rigidez y la estabilidad inicial?
30. Defina condición de balanceo inestable o lolling. Dibuje la curva de estabilidad estática intacta para un buque que presenta la condición de balance inestable y uno que tiene características bruscas de estabilidad, utilizando para ambos el mismo gráfico y compare sus características de estabilidad inicial.
31. Dibuje un diagrama de un buque escorado hacia estribor por fuerzas externas con un GM negativo.
32. Explique a que podría deberse que un buque tanque que entrega petróleo en un muelle podría empezar a experimentar balance inestable.
33. Una barcaza de desembarco puede modelarse como una caja rectangular. La barcaza tiene



las siguientes dimensiones y parámetros hidrostáticos:

Eslora = 40,2 m	Calado (m)	KM (m)	TCI (t/cm)
Manga = 10,7 m	1,22	8,4	4,5
Calado = 2,1 m	1,52	7,0	4,5
Cubierta de carga ubicada a 2,1 m sobre la quilla y la borda se extiende 1,2 m sobre la cubierta	1,83	6,1	4,5

Cuando se encuentra vacía, la barcaza flota con un calado de 1,22 metros y tiene un KG = 0,58 metros. Cuando se carga a su máxima capacidad puede cargar 3 tanques de infantería. Cada tanque pesa 61 toneladas y tiene un centro de gravedad a 1,22 metros sobre el suelo; es decir, a 1,22 metros sobre la cubierta de la barcaza.

- Determine el calado y el desplazamiento de la barcaza después de cargar los tanques.
- ¿Cuál es el centro de gravedad de la barcaza después de cargar vehículos?
- ¿Cuál es la altura metacéntrica de la barcaza antes y después de ser cargada con los vehículos? ¿Cómo afecta este proceso a la estabilidad de la barcaza cuando se carga a su máxima capacidad?
- En una fuerte lluvia tipo tropical, la barcaza acumula 5 centímetros de agua dulce sobre en la cubierta. Calcule el peso del agua que se acumuló sobre la barcaza y su nuevo KG.
- El agua de lluvia crea una superficie libre en la cubierta. Calcule la altura metacéntrica efectiva de la barcaza después de la tormenta.
- Utilizando los mismos ejes, dibuje una curva de brazo de adrizamiento para la barcaza en las siguientes condiciones: sin carga, totalmente cargada, con superficie libre en la cubierta.
- ¿Qué se puede hacer para eliminar la posibilidad de una superficie libre?