

Estudio de la Estabilidad Dinámica en Buques de Superficie

*“La importancia de lo que no se ve,
pero si se siente a bordo”*

INTRODUCCIÓN

Los buques de superficie están diseñados, construidos y operados para cumplir con una serie de funciones específicas de manera eficiente y segura. Una parte importante de su vida útil se lleva a cabo con mares agitadas y en numerosas ocasiones en condiciones duras e incluso severas, debiendo cumplir con seguridad las diferentes misiones para las que han sido diseñados y construidos, soportando las aceleraciones, flexiones y/o torsiones que puedan provocarle sin que se genere fallo estructural alguno. Debido a ello, la estabilidad de sus movimientos es uno de requisitos principales además de ser un factor fundamental de su seguridad.

El estudio del movimiento y la operatividad de un buque está basado normalmente en mar en calma o llana, siendo útiles estas consideraciones para que los cálculos de ingeniería estén dentro de un margen de error pequeño. De cualquier modo, a medida que se superponen condiciones ambientales reales, la exactitud se reduce. El movimiento real de un buque, en un sistema tridimensional y con una mar frecuentemente hostil, únicamente puede predecirse dentro de un margen de exactitud del 50% aproximadamente.

El conocimiento de la dinámica de respuesta de los buques al actuar sobre la variable de mando (timón) y estar sujetos a perturbaciones exteriores (viento, mar, corrientes, etc.) es fundamental para resolver los dos grandes problemas de la navegación marítima: seguridad y economía.

La estabilidad dinámica, no debe ser entendida como una evaluación del trabajo desarrollado en la inclinación cuasi estática de un buque de superficie desde su posición de adrizado hasta tomar un ángulo de escora determinado. La estabilidad dinámica significa aquí, estabilidad de los movimientos del buque entre olas tratándose de un estudio de innegable complejidad. La relación entre la estabilidad dinámica y la energía de las olas es compleja, dependiendo de ciertos factores como, por ejemplo, la velocidad y rumbo del buque en relación con la velocidad y dirección de la ola.

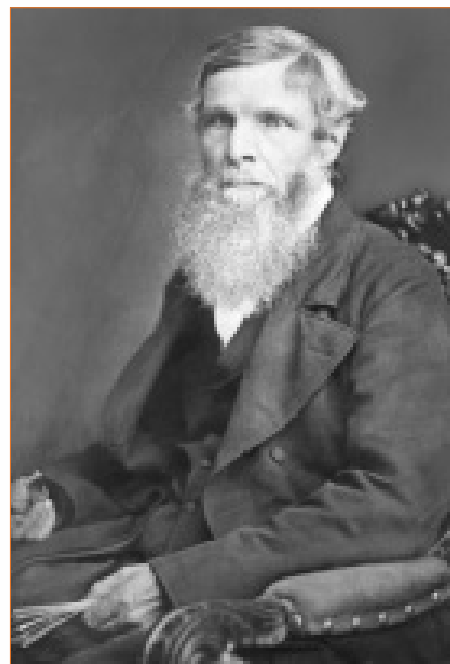
Desde el punto de vista de la estabilidad entre olas, los movimientos de traslado vertical y cabeceo no son de importancia; sin embargo, en determinadas circunstancias el balance afecta de forma muy importante al buque. En 1863, W. Froude, distinguido ingeniero de la revolución industrial, observó que: *“...los buques podían poseer características de balance indeseables cuando la frecuencia de oscilación libre con cabeceo sea aproximadamente el doble de la de una oscilación libre con balance...”*. A pesar de que Froude reconoció que el problema de la estabilidad entre olas debía considerarse desde el punto de vista dinámico en vez del estático, la gran mayoría de los estudios se basaron en la estabilidad estática en aguas tranquilas. Algunas ideas sobre el uso de la estabilidad dinámica introdujeron la utilización del área bajo la curva de brazos adrizantes (propuesta por Reed en 1868), como un medio para evaluar la estabilidad del buque con aguas tranquilas.

De todos los movimientos que un buque puede dar, y desde el punto



Capt. SEBASTIÁN ROJO GARCÍA
(Práctico de Garrucha & Carboneras)

de vista de la seguridad marítima, el de balance es el más importante; su estudio puede realizarse desde un enfoque numérico (práctica habitual) o una perspectiva experimental. Aunque la seguridad marítima del buque abarca más facetas que la estabilidad, podemos afirmar, sin cometer error alguno, que: *“una estabilidad satisfactoria es una característica muy importante”*.



William Froude (1810-1879).

Dinámicamente hablando, el movimiento de balance de un buque puede obtenerse a partir de los distintos momentos que actúan sobre él: a) momentos de inercia debido a la masa real y a la virtual del buque, b) momento de amortiguamiento, c) momento elástico o adrizante, d) momentos excitadores (olas, viento, corrimiento de carga, etc.), y e) momentos debido a otros modos de movimiento del buque. De todos ellos el más importante y difícil de determinar es el de amortiguamiento.



Fuente: www.stormgeo.com/products/s-suite/s-routing/s-routing-classic-routing/

La dinámica no lineal, es una parte de la matemática aplicada que de manera significativa se ha desarrollado en los últimos años, proporcionando una amplia perspectiva para la investigación de la estabilidad del buque por permitir la consideración de numerosas combinaciones de sus movimientos. Todo esto implica la necesidad de identificar las diferentes situaciones de peligro que puedan encontrarse en la mar con el objetivo de modelarlas matemáticamente y reproducirlas con precisión en un canal de experiencia hidrodinámicas, y así, evaluarlas desde el punto de vista de riesgo para el buque. Solamente a partir de ahí, será posible extraer procedimientos seguros y razonables que aumenten la seguridad de los buques.

ESTABILIDAD DEL BUQUE ENTRE OLAS: MOVIMIENTO DE BALANCE

Al paso de la ola, se inicia el balance del buque debido a una traslación del centro de carena, dando origen a la formación del par de estabilidad entre olas, que trata de llevarlo a su posición de equilibrio. La amplitud absoluta de este balance

dependerá de las posiciones relativas del plano diametral respecto a la vertical aparente, y de ésta respecto a la vertical verdadera¹.

El movimiento de balance será consecuencia del movimiento propio de oscilación del buque, y del movimiento ondulatorio de la mar, es decir, de los periodos de ambos movimientos; que según sean más o menos concordantes, harán que las amplitudes del balance absoluto sean mayores o menores.

La posición de equilibrio de un buque a lo largo del perfil de la ola se produce cuando coincide su plano diametral con la vertical aparente, como resulta que ésta varía continuamente a la vez que varía el perfil de la ola, el buque la buscará impulsado por su par de estabilidad entre olas dando lugar a los balances; cuando el eje de referencia para medir los balances, sea la vertical verdadera, los balances serán absolutos y cuando se trate de la vertical aparente instantáneamente serán balances relativos².

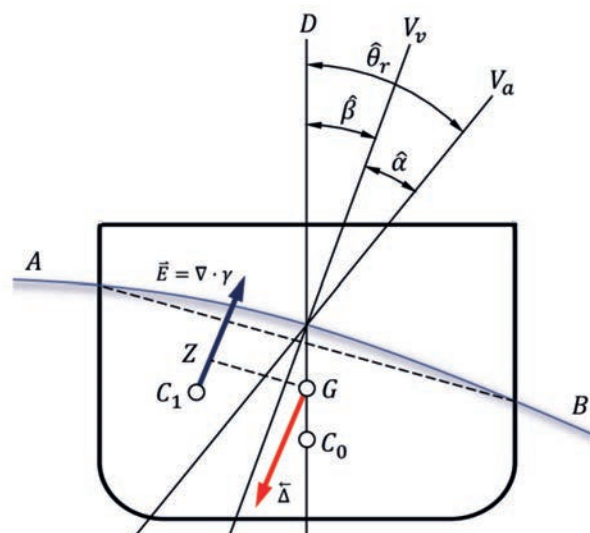


Fig. 1: Balance absoluto y relativo.

1.- Recordemos que las ecuaciones que estudian el balance de un buque de superficie, sin considerar la resistencia del agua, serán las correspondientes a un sistema armónico simple.

2.- Las olas son originadas por la acción del viento sobre la superficie libre de la mar, que cuando está en equilibrio y reposo es horizontal. Esta acción rompe el equilibrio de dicha superficie, dando lugar a elevaciones y depresiones que irán aumentando de dimensiones, hasta formar una ondulación asimétrica y periódica de forma no conocida, que no responde al análisis matemático, por no existir fórmulas que la relacionen con la fuerza del viento a la que deben su forma. Al cesar el viento estas ondulaciones, toman un perfil regular, simétrico y periódico, al que se le da el nombre de mar regular teórica.

En la (fig. 1) tenemos las referencias siguientes:

AB	=	Perfil de una ola trocoidal.
D	=	Plano diametral o longitudinal del buque.
V_v	=	Vertical verdadero.
V_a	=	Vertical aparente formada por el ángulo $\hat{\alpha}$ con la vertical verdadera, que es la pendiente instantánea de la ola en el punto considerado del perfil.
$\hat{\beta}$	=	Ángulo que forma el plano diametral con la vertical verdadera, llamado balance absoluto.
$\hat{\theta}$	=	Ángulo que forma el plano diametral con la vertical aparente, llamado balance relativo.
$\hat{\alpha}$	=	Ángulo que forman ambas verticales o pendiente de la ola.

El movimiento de balance del buque entre olas es un movimiento de giro alrededor del eje longitudinal Ox generado como consecuencia directa del movimiento propio de oscilación del buque y del movimiento ondulatorio de la mar, es decir, de los periodos de ambos movimientos; que según sean más o menos concordantes, harán que las amplitudes del balance absoluto sean mayores o menores. En resumen, este movimiento se debe a los cambios constantes de dirección de la vertical aparente a lo largo del perfil trocoidal de la ola, a la cual, trata de seguir el plano diametral buscando su posición de equilibrio, por efecto del par de estabilidad entre olas, $(\Delta_a \cdot GZ)$.

Cuando un buque se encuentra afectado por un movimiento oscilatorio de balance generado por fuerzas disipativas (no conservan su energía debido a pérdidas por fricción u otras causas), se considera que sobre él actúan dos momentos, por una parte, está el escorante que separa al buque de su posición de equilibrio, y por la otra el adrizante que se opone al anterior. Cuando un buque abandona su posición de equilibrio (adrizado o con escora permanente) debido a la presencia de un momento o par escorante mayor que el momento o par adrizante, el momento total resultante de todas las fuerzas actuantes sobre el buque será la suma de ambos con sus signos correspondientes (un buque sometido a estas fuerzas acabará volviendo a su posición de equilibrio estable).

$$M_T = M_e - M_a \quad [1]$$

La energía de rotación es la energía cinética de un cuerpo rígido que gira en torno a un eje fijo, por lo que, depende del momento de inercia y de la velocidad angular del cuerpo.

$$E_R = \frac{1}{2} I_x \cdot \omega^2 \quad [2]$$

Donde, I_x es el momento de inercia del cuerpo en torno al eje Ox y, ω la velocidad angular. En un buque afectado por un movimiento oscilatorio de balance se cumple que: $M_T = E_R$. Si escribimos ahora, en su forma integral, la ecuación (1), resultará

$$E_R = M_e - M_a \rightarrow \frac{1}{2} I_x \cdot \omega^2 = \int_{\theta_e}^{\Phi} M_e \cdot d\theta - \int_{\theta_e}^{\Phi} M_a \cdot d\theta \quad [3]$$

Los momentos o pares adrizante y escorante únicamente actúan en presencia del movimiento de balance y durante un cierto arco de ángulos de escora del buque de una banda hacia la otra, generándose una energía cinética de rotación que se calcula integrando los momentos que están actuando desde el ángulo de partida (escora permanente o buque adrizado) hasta el ángulo de escora máximo que se alcanza³.

ESTABILIDAD DINÁMICA

Desde el punto de vista físico, cuando aplicamos una fuerza sobre un objeto en movimiento durante una determinada distancia, se origina un trabajo⁴; si además consideramos que, dicha distancia se recorre en un determinado tiempo con una velocidad determinada, ya no hablamos de trabajo sino de potencia, es decir, del producto de la fuerza aplicada por la velocidad.

Lo mismo sucede con un buque de superficie cuando se escora a una de sus bandas debido a la presencia de una fuerza o momento escorante que actúa sobre él; seguidamente, nuestro buque se recuperará hasta quedar adrizado debido a la acción opuesta de una fuerza o momento adrizante. Estas dos fuerzas o momentos no actúan de forma puntual, sino que la fuerza o momento escorante lo hace mientras el buque se esta escorando a una determinada banda y la fuerza o momento adrizante actúa cuando recupera realizando un recorrido en sentido contrario. Al extinguirse la fuerza o momento escorante, el buque se adrizará debido al trabajo realizado por el brazo del par adrizante. La medida del trabajo adrizante es lo que denominamos estabilidad dinámica. Como en estos movimientos hay involucrado un trabajo y una

3. Cuando el buque se desplaza en el agua arrastra junto a sí un cierto volumen de agua que depende de su movimiento, de la profundidad y de la disposición de los márgenes, en el caso de un canal. Este volumen de agua desplazado junto al buque aumenta la masa en movimiento y, por tanto, debe tenerse en cuenta a efectos de cualquier cálculo de fuerzas y energías. Por esta razón, si no se considera la masa añadida estamos realizando un cálculo mucho más conservador que el real, por lo que calcularemos un ángulo de escora mayor que el que verdaderamente alcanzará el buque en su balance.

4. El trabajo es una magnitud física escalar que se utiliza para medir la energía necesaria para aplicar una fuerza durante un determinado tiempo. Puede ser un número positivo o negativo, ya que para que sea positivo la fuerza debe actuar en la dirección del desplazamiento, y para que sea negativo, la fuerza tiene que ser ejercida en la dirección opuesta. En este sentido, el trabajo puede dividirse en: a) trabajo nulo, cuando vale cero, b) trabajo motor, cuando la fuerza y el desplazamiento están en la misma dirección y c) trabajo resistente, cuando la fuerza y el desplazamiento están en direcciones opuestas.

energía, será únicamente física la diferencia entre las estabilidades estática y dinámica.

En la mar, los buques están afectados constantemente por la acción de fuerzas externas que gastan energía al escorarlo. El trabajo que esas fuerzas externas tienen que realizar para escorar al buque hasta un ángulo determinado y además mantenerlo, se encuentra almacenado a bordo en forma de energía potencial. Ahora bien, como el movimiento de inclinación transversal del buque es un movimiento de rotación alrededor de un eje longitudinal de oscilación, entonces, si la energía cinética transversal es el trabajo realizado por el brazo del par de estabilidad durante este movimiento de giro, para calcular la estabilidad dinámica tendremos que usar la fórmula de la mecánica que nos facilita el trabajo dentro del movimiento de rotación⁵.

- **Estabilidad dinámica.** Representa el trabajo que hay que realizar para vencer la resistencia ofrecida por el par adrizante, durante el giro que lleva al buque desde su posición inicial de equilibrio estático hasta una inclinación o escora isocarena cualquiera, suponiendo que este movimiento de giro se haga lo suficientemente lento, para que las velocidades angulares inicial y final del buque, así como las resistencias pasivas, del agua y aire sean nulas, que el eje de inclinación transversal sea constante, y que el balance se haga en un medio no resistente y en calma. Como las moléculas no tienen velocidad, se deduce que la fuerza viva absorbida por el medio será constantemente nula y, por lo tanto, el trabajo motor (par escorante) será siempre igual al trabajo resistente (par adrizante). En resumen, el trabajo desarrollado por el par adrizante o resistente hará que el buque vuelva a su posición de equilibrio, resistiéndose al movimiento generado por el par motor o escorante; por último, para que exista equilibrio, el par adrizante o resistente ha de ser igual al par motor o escorante.



Fuente: www.interest.co.nz/rural-news/99874.

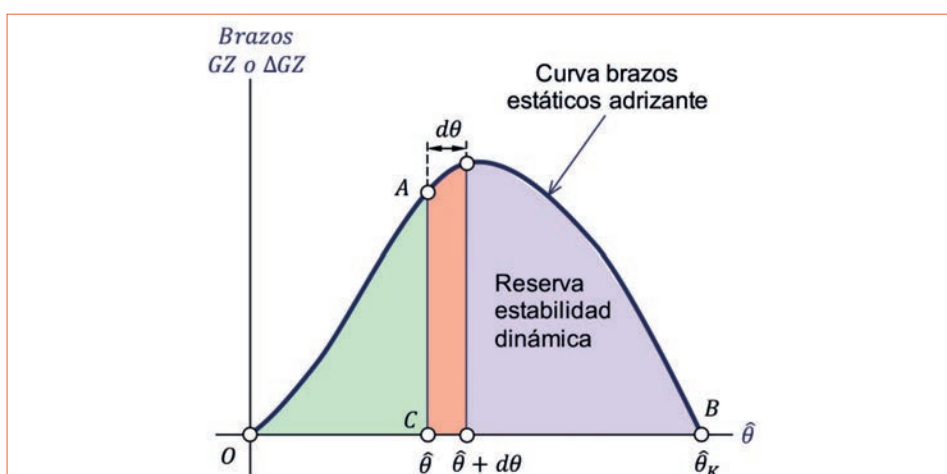


Fig. 2: Trabajo realizado entre dos escoras.

- **Estabilidad dinámica total.** Representa la energía que puede absorber un buque hasta agotar su estabilidad estática transversal. Hay que destacar que, además de coincidir con el ángulo de escora crítico o límite de estabilidad $\hat{\theta}_{Cd}$, los pares escorante y adrizante deben ser iguales.

Observemos ahora la (fig. 2), donde el área de la zona sombreada representa el trabajo realizado al escorar el buque desde un ángulo $\hat{\theta}$ hasta otro ángulo $\hat{\theta} + d\theta$. Para calcular la estabilidad dinámica a partir de la posición de equilibrio inicial de un buque adrizado, sumaremos los trabajos resistentes realizados por el par de estabilidad en cada instante del giro. Este trabajo, para una inclinación $d\theta$, será:

$$d_T = \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \rightarrow GZ = GM \cdot \sin \hat{\theta} \rightarrow d_T = \Delta \cdot GM \cdot \sin \hat{\theta} \cdot d\theta$$

Si queremos medir el trabajo realizado por el par de estabilidad entre la posición de equilibrio inicial y una inclinación isocarena final, $\hat{\theta}$ se deben sumar los trabajos elementales entre ambas posiciones; es decir, integrar la expresión anterior.

$$T = \int_0^{\hat{\theta}} \Delta \cdot GM \cdot \sin \hat{\theta} \cdot d\theta = \Delta \cdot GM \cdot \int_0^{\hat{\theta}} \hat{\theta} \cdot d\theta \rightarrow \boxed{T = \frac{1}{2} \cdot \Delta \cdot GM \cdot \hat{\theta}^2} \quad [4]$$

La expresión (4) es únicamente válida para ángulos de escora dentro de la estabilidad inicial, o sea, el trabajo elemental efectuado por el par adrizante para una inclinación isocarena transversal muy pequeña.

5.- La mecánica nos enseña que si sobre un cuerpo aplicamos un momento de magnitud M , el cuerpo adquiere un movimiento de rotación, si suponemos que ha girado un ángulo $d\hat{\theta}$, el producto $M \cdot d\hat{\theta}$ representa el trabajo elemental realizado por ese momento aplicado a un cuerpo al girarlo un ángulo $d\hat{\theta}$.

La expresión que nos facilita el valor del área comprendida entre la curva y el eje de las abscisas será:

$$A = \int_0^{\theta_K} \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \quad [5]$$

Como el trabajo total realizado por el par de estabilidad para una escora finita $\hat{\theta}_K$, es decir, la estabilidad dinámica, es igual a:

$$T = \int_0^{\theta_K} \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \quad [6]$$

Igualando las expresiones (5) y (6), se cumplirá que:

$$A = T = \Delta \int_0^{\theta_K} GZ \cdot d\theta \quad [7]$$

Expresión que representa la capacidad que tiene un buque para absorber y almacenar la energía suministrada por causas externas. Por lo tanto, el trabajo realizado para una escora finita $\hat{\theta}$, será la suma de todas las áreas infinitamente pequeñas comprendidas entre la curva de estabilidad, la ordenada correspondiente al ángulo de inclinación finita $\hat{\theta}$ y el eje horizontal (área AOC), que mide la estabilidad dinámica correspondiente a la escora finita $\hat{\theta}$; el trabajo total necesario para anular la estabilidad del buque lo mide el área OAB. Como el desplazamiento es constante, lo único que hay que integrar son los brazos $\overline{GZ}_\theta$, entonces el brazo dinámico correspondiente a un ángulo de escora $\hat{\theta}$, será

$$BD_\theta = \int_{\theta_0}^{\theta} \overline{GZ}_\theta \cdot d\theta \quad [8]$$

Para integrar esta curva usaremos los métodos de integración aproximada de los Trapecios o de Simpson (reglas I, II y III) por no conocerse el valor $y = f(x)$; con referencia a las unidades, se utilizarán de acuerdo con lo recopilado en la tabla adjunta:

Brazos	
Estáticos	Dinámicos
mm	mm · radianes
m	m · radianes
Momentos	
Estáticos	Dinámicos
tns · mm	tns · mm · radianes
tns · m	tns · m · radianes



Fuente: Photographe by Volker Diekamp.

Conclusiones:

1. El marino mercante debe procurar que su buque tenga una cantidad considerable de estabilidad dinámica que le permitirá absorber las acciones de energías extremas e internas, rachas bruscas de viento, golpes de la mar, etc., sin tomar una escora más allá de ciertos límites de seguridad.
2. La importancia de la estabilidad dinámica reside en la energía productora de estabilidad que tiene acumulada un buque permitiéndole resistir las acciones de fuerzas internas o externas que tiendan a desestabilizarlo.
3. El trabajo realizado por el par adrizante nos informa del valor de la estabilidad dinámica, que utilizaremos como base, para conocer profundamente el comportamiento real de un buque en la mar.
4. La diferencia, entre la estabilidad dinámica y la estabilidad estática transversal, es únicamente física.

CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DINÁMICA

Para calcular el valor de la estabilidad dinámica, se utilizan los métodos que se exponen a continuación:

Fórmula de Henry Moseley (1801-1872)

Todos los buques están sujetos a dos fuerzas verticales: a) el desplazamiento $\bar{\Delta}$ aplicado sobre el centro de gravedad, y b) el empuje $\bar{E}$, que pasa por el centro de carena. Dicho esto, cuando se inclina o escora un buque de superficie, las fuerzas actuantes ($\bar{\Delta}$ y $\bar{E}$) se separan verticalmente, resultando que: “el trabajo realizado para escorar el buque será el mismo que el trabajo a realizar para separar estas dos fuerzas verticalmente”. El trabajo, al que hacemos referencia, será igual a una de las fuerzas por el incremento del brazo, es decir, al desplazamiento por la variación vertical entre los centros de gravedad y carena. Al medir la variación vertical del brazo entre ambos centros, se obtiene la medida de la estabilidad dinámica.


$$C_0 R = C_0 H \cdot \sin \hat{\theta} \rightarrow \begin{cases} C_0 R = \varphi \\ C_0 H = h \end{cases} \rightarrow \varphi = h \cdot \sin \hat{\theta} \quad [9]$$
$$G_0 Z = G_0 H \cdot \sin \hat{\theta} = (h - a) \cdot \sin \hat{\theta} \rightarrow G_0 Z = h \cdot \sin \hat{\theta} - a \cdot \sin \hat{\theta} \quad [10]$$
$$\begin{aligned}
 T_R &= \Delta \cdot \int_0^\theta G_0 Z \cdot d\theta = \Delta \cdot \int_0^\theta (h \cdot \sin \hat{\theta} - a \cdot \sin \hat{\theta}) \cdot d\theta \\
 T_R &= \Delta \cdot \left(\int_0^\theta \underbrace{h \cdot \sin \hat{\theta}}_\varphi \cdot d\theta - \int_0^\theta a \cdot \sin \hat{\theta} \cdot d\theta \right) = \Delta \cdot \left(\varphi \cdot \int_0^\theta d\theta - a \cdot \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta \right) \\
 T_R &= \Delta \cdot \left(C_1 R - \left(a \cdot [-\cos \hat{\theta}]_0^\theta \right) \right) = \Delta \cdot \left(C_1 R - \left(a \cdot (-\cos \hat{\theta} + \cos 0) \right) \right) = \Delta \cdot \left(C_1 R + \underbrace{a \cdot \cos \hat{\theta}}_{ZR} - \underbrace{a \cdot \cos 0}_{C_o G_o} \right) \\
 T_R &= \Delta \cdot \left(\underbrace{C_1 R + ZR}_{C_1 Z} - C_o G_o \right) \rightarrow \boxed{T_R = \Delta \cdot [C_1 Z - C_o G_o]}
 \end{aligned}$$

OG_0	=	Distancia del centro de gravedad por encima o por debajo de la línea de flotación, buque adrizado.
OC_0	=	Ordenada del centro de carena respecto a la flotación en el mismo caso.
SZ	=	Ordenada del centro de gravedad con respecto a la nueva flotación isocarena F_1L_1 .
SC_1	=	Ordenada del centro de carena por debajo de la nueva flotación F_1L_1 .

En la (fig.3) observamos que la distancia inicial entre los centros de gravedad y carena es: $C_0G_0 = C_0O + OG_0$, y la distancia final entre ambos centros: $C_1Z = C_1S + SZ$. Durante la escora del buque, la variación vertical de la distancia entre los centros de gravedad y carena será $C_0G_0 - C_1Z$, y como resulta que: $C_0G_0 < C_1Z$, esta distancia será negativa.

Ahora pasemos a deducir los valores de C_1R y RZ :

$$\frac{C_0C_1}{g_0g_1} = \frac{C_1R}{g_0h_0 + g_1h_1} = \frac{C_0R}{h_0h_1} = \frac{V_C}{\nabla} \rightarrow \frac{C_1R}{g_0h_0 + g_1h_1} = \frac{V_C}{\nabla} \rightarrow C_1R = \frac{V_C \cdot (g_0h_0 + g_1h_1)}{\nabla} \quad [12]$$

$$RZ = G_0A = C_0G_0 \cdot \cos \hat{\theta} \quad [13]$$

Como resulta que,

$$C_1Z = C_1R + RZ = \frac{V_C \cdot (g_0h_0 + g_1h_1)}{\nabla} + C_0G_0 \cdot \cos \hat{\theta} \quad [14]$$

Sustituyendo (14) en (11).

$$T_R = \Delta \cdot \left[\frac{V_C \cdot (g_0h_0 + g_1h_1)}{\nabla} + C_0G_0 \cdot \cos \hat{\theta} - C_0G_0 \right]$$

Por último, sacando factor común C_0G_0 ,

$$T_R = \Delta \cdot \left[\frac{V_C \cdot (g_0h_0 + g_1h_1)}{\nabla} + C_0G_0 \cdot (1 - \cos \hat{\theta}) \right] \quad [15]$$

La ecuación (15) es la conocida como "Moseley's formula for Dynamic Stability", que calcula la estabilidad dinámica de una forma directa, resultando su aplicación laboriosa y complicada; debido a ello, el proceso descrito no se utiliza en los cuadernos de estabilidad, escora y calados preparados por los astilleros.

Estudiemos ahora el caso de una gabarra de forma paralelepípedica donde "y" es su semimanga (fig.4). Si operamos los triángulos rectángulos $x_1 g_1 h_1$ y $x_0 g_0 h_0$ obtenemos:

$$g_1h_1 = x_1g_1 \cdot \cos \hat{\theta} = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \tan \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\theta}$$

$$g_1h_1 = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \frac{\sin \hat{\theta}}{\cos \hat{\theta}} \cdot \cos \hat{\theta} = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \sin \hat{\theta}$$

$$g_0h_0 = x_0g_0 \cdot \cos \hat{\theta} = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \tan \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\theta}$$

$$g_0h_0 = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \frac{\sin \hat{\theta}}{\cos \hat{\theta}} \cdot \cos \hat{\theta} = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \sin \hat{\theta}$$

Sumando las expresiones para g_0h_0 y g_1h_1 ,

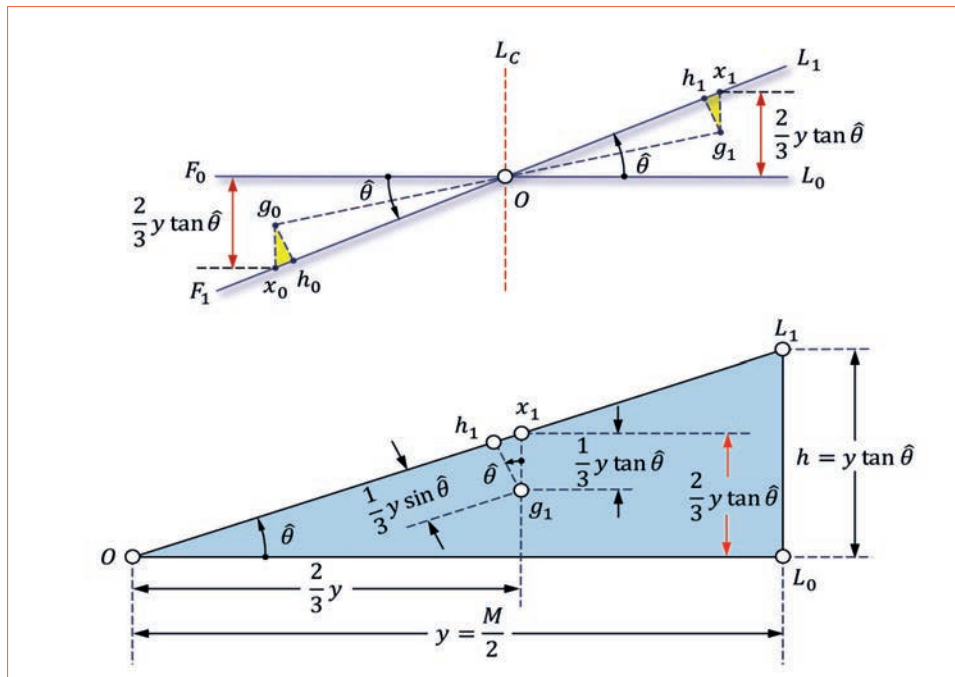


Fig. 4: Flotación de una gabarra paralelepípedica.

$$g_0h_0 + g_1h_1 = \frac{1}{3} \cdot y \cdot \sin \hat{\theta} + \frac{1}{3} \cdot y \cdot \sin \hat{\theta} = \frac{2}{3} \cdot y \cdot \sin \hat{\theta} = \frac{2}{3} \cdot \frac{M}{2} \cdot \sin \hat{\theta} = \frac{1}{3} \cdot M \cdot \sin \hat{\theta}$$

El volumen de la cuña será,

$$V_c = \frac{1}{2} (y \cdot E_F \cdot h) = \frac{1}{2} \left(\frac{M}{2} \cdot E_F \cdot \frac{y}{M/2} \cdot \tan \hat{\theta} \right) V_c = E_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{M}{2} \cdot \tan \hat{\theta} = E_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{M^2}{4} \cdot \tan \hat{\theta}$$

Hay que destacar que, para el caso que nos ocupa, la ecuación (15) se escribe de la forma siguiente:

$$T_R = E_F \cdot M \cdot C_m \cdot \gamma \cdot \left[\frac{E_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{M^2}{4} \cdot \tan \hat{\theta} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot M \cdot \sin \hat{\theta} \right)}{E_F \cdot M \cdot C_m} - (KG - KC) \cdot (1 - \cos \hat{\theta}) \right]$$

$$T_R = E_F \cdot M \cdot C_m \cdot \gamma \cdot \left[\frac{E_F \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{M^2}{4} \cdot \frac{M}{3} \cdot \tan \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\theta}}{E_F \cdot M \cdot C_m} - (KG - KC) \cdot (1 - \cos \hat{\theta}) \right]$$

$$T_R = E_F \cdot M \cdot C_m \cdot \gamma \cdot \left[\frac{E_F \cdot \frac{M^3}{24} \cdot \tan \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\theta}}{E_F \cdot M \cdot C_m} - (KG - KC) \cdot (1 - \cos \hat{\theta}) \right]$$

$$T_R = E_F \cdot M \cdot C_m \cdot \gamma \cdot \left[\frac{M^2 \cdot \tan \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\theta}}{24 \cdot C_m} - (KG - KC) \cdot (1 - \cos \hat{\theta}) \right] \quad [16]$$

La ecuación (16) representa otra forma o manera de presentar la ecuación (15)

Trabajo realizado por el momento del par escorante

El método que vamos a exponer seguidamente nos determina el valor de la estabilidad dinámica calculando el trabajo realizado por el momento del par de fuerza escorante. Supongamos que, el trabajo elemental realizado para escorar un buque un ángulo $d\hat{\theta}$, se obtiene multiplicando el momento por el ángulo de escora en radianes

$$dT = M_a \cdot d\hat{\theta} \rightarrow M_a = \Delta \cdot GZ$$

$$dT = \Delta \cdot GZ \cdot d\hat{\theta}$$



Fuente: FF45806-Marin-Seakeeping-Harsh-Weather.JPG

Si ahora integramos entre dos ángulos de escora (0 y $\hat{\theta}$), hallaremos el trabajo realizado para llevar al buque desde la condición inicial (adrizado) hasta la final (escorado),

$$\int_0^{\hat{\theta}} dT = \int_0^{\hat{\theta}} \Delta \cdot GZ \cdot d\hat{\theta} \rightarrow T = \int_0^{\hat{\theta}} \Delta \cdot GZ \cdot d\hat{\theta}$$

Si el ángulo de escora $\hat{\theta}$ se encuentra dentro de la estabilidad inicial: $GZ = GM \cdot \sin \hat{\theta}$, sustituyendo

$$T = \int_0^{\hat{\theta}} \Delta \cdot GM \cdot \sin \hat{\theta} \cdot d\hat{\theta} = \Delta \cdot \int_0^{\hat{\theta}} GM \cdot \sin \hat{\theta} \cdot d\hat{\theta} \quad [17]$$

El valor de la variable que hay dentro de la integral se le conoce como: brazo dinámico de estabilidad,

$$BD = \int_0^{\hat{\theta}} GM \cdot \sin \hat{\theta} \cdot d\hat{\theta} \rightarrow BD = \int_0^{\hat{\theta}} GZ \cdot d\hat{\theta} \quad [18]$$

El trabajo es igual al desplazamiento por el brazo dinámico, entonces (17) se escribe de la siguiente forma:

$$T = \Delta \cdot BD \quad [19]$$

Derivando (19) respecto al ángulo de escora, hallamos otra relación entre los brazos dinámico y estático.

$$BD = \int_0^\theta GZ \cdot d\hat{\theta} = GZ \int_0^\theta d\hat{\theta} \rightarrow BD' = GZ \quad [20]$$

Conclusión. El brazo dinámico entre una escora inicial y otra final es el valor de la integral de los brazos estáticos entre ambas escoras y, el valor del brazo estático para una escora es la derivada del brazo dinámico con respecto al ángulo de escora considerado.

Estabilidad dinámica en función de los brazos GZ para un buque de costados verticales

Sabemos que, el valor del brazo estático de un buque de costados rectos es el siguiente:

$$GZ = \sin \hat{\theta} \cdot \left(GM + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \tan^2 \hat{\theta} \right);$$

si sustituimos esta expresión en la ecuación (6),

$$T = \int_0^\theta \Delta \cdot GZ \cdot d\theta = \Delta \cdot \int_0^\theta \left[\sin \hat{\theta} \cdot \left(GM + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \tan^2 \hat{\theta} \right) \right] \cdot d\theta$$

$$T = \Delta \cdot \int_0^\theta \left[\sin \hat{\theta} \cdot GM + \frac{1}{2} \cdot \sin \hat{\theta} \cdot CM \cdot \tan^2 \hat{\theta} \right] \cdot d\theta = \Delta \cdot \left[\int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot GM \cdot d\theta + \int_0^\theta \frac{1}{2} \cdot \sin \hat{\theta} \cdot CM \cdot \tan^2 \hat{\theta} \cdot d\theta \right]$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot \tan^2 \hat{\theta} \cdot d\theta$$

$$\text{Resulta que: } \tan^2 \hat{\theta} = \frac{\sin^2 \hat{\theta}}{\cos^2 \hat{\theta}} \text{ sustituyendo}$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \int_0^\theta \left(\sin \hat{\theta} \cdot \frac{\sin^2 \hat{\theta}}{\cos^2 \hat{\theta}} \right) \cdot d\theta$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \int_0^\theta \left(\frac{\sin \hat{\theta} \cdot (1 - \cos^2 \hat{\theta})}{\cos^2 \hat{\theta}} \right) \cdot d\theta$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \int_0^\theta \left(\frac{\sin \hat{\theta} - \sin \hat{\theta} \cdot \cos^2 \hat{\theta}}{\cos^2 \hat{\theta}} \right) \cdot d\theta$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \int_0^\theta \left(\frac{\sin \hat{\theta}}{\cos \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\theta}} - \frac{\sin \hat{\theta} \cdot \cos^2 \hat{\theta}}{\cos^2 \hat{\theta}} \right) \cdot d\theta$$

$$\text{Ahora tenemos que: } \frac{\sin \hat{\theta}}{\cos \hat{\theta}} = \tan \hat{\theta} \text{ quedando,}$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \int_0^\theta (\tan \hat{\theta} \cdot \sec \hat{\theta} - \sin \hat{\theta}) \cdot d\theta$$

$$T = \Delta \cdot GM \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot \left(\int_0^\theta \tan \hat{\theta} \cdot \sec \hat{\theta} \cdot d\theta - \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta \right)$$

Integrando la expresión anterior,

$$T = \Delta \cdot GM \cdot [-\cos \hat{\theta}]_0^\theta + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot ([\sec \hat{\theta}]_0^\theta - [-\cos \hat{\theta}]_0^\theta)$$

$$T = \Delta \cdot GM \cdot \left[-\cos \hat{\theta} + \underbrace{\cos 0}_1 \right] + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot \left(\left[\sec \hat{\theta} - \underbrace{\sec 0}_1 \right] - \left[-\cos \hat{\theta} + \underbrace{\cos 0}_1 \right] \right)$$

$$T = \Delta \cdot GM \cdot [1 - \cos \hat{\theta}] + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot [\sec \hat{\theta} - 1 + \cos \hat{\theta} - 1]$$

$$T = 2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot [\sec \hat{\theta} + \cos \hat{\theta} - 2]$$

$$T = 2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot [\sec \hat{\theta} \cdot (1 + \cos^2 \hat{\theta} - 2 \cos \hat{\theta})]$$

Como resulta que: $1 + \cos^2 \hat{\theta} - 2 \cos \hat{\theta} = (1 - \cos \hat{\theta})^2$, sustituyendo,

$$T = 2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot [\sec \hat{\theta} \cdot (1 - \cos \hat{\theta})^2]$$

$$T = 2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] + \frac{4}{2} \cdot CM \cdot \Delta \cdot \sec \hat{\theta} \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right]^2$$

$$T = 2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] + 2 \cdot CM \cdot \Delta \cdot \sec \hat{\theta} \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right]^2$$

Factor común $2 \cdot \Delta \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right]$ sustituyendo,

$$T = 2 \cdot \Delta \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] \cdot \left(GM + CM \cdot \sec \hat{\theta} \cdot \left[\frac{1 - \cos \hat{\theta}}{2} \right] \right) \quad [21]$$

La ecuación (21), proporciona el valor de la estabilidad dinámica en función de los brazos GZ para un buque de costados verticales.

ECUACIÓN DEL BRAZO DINÁMICO: INTERPRETACIÓN GEOMÉTRICA

El brazo dinámico entre dos flotaciones determinadas es la variación de la distancia vertical entre los centros de gravedad y carena que se produce al pasar el buque de la flotación inicial a la flotación final; de esta variación, depende el trabajo realizado por el par de fuerzas desplazamiento ($+\Delta$) y empuje ($-\Delta$).

El valor del brazo dinámico y su relación con el brazo de estabilidad estática se deduce teniendo en cuenta las condiciones de construcción ofrecidas en la (fig.5), donde:

a) G_0Z es paralelo a C_0R , y es perpendicular a $C_\theta M_\theta$.

b) $C_\theta M_\theta$ es paralelo a C_1Q y paralelo a PG_0 .

El brazo dinámico, es la diferencia entre los brazos verticales C_0G_0 (buque adrizado) y $G_\theta Z$ (buque escorado), entonces

$$BD = C_\theta Z - C_0G_0 = a_\theta - a \quad [22]$$

Como resulta que:

$$a_\theta = C_\theta R + RZ \rightarrow C_\theta R = C_1Q - C_1S$$

$$a_\theta = C_1Q - C_1S + RZ \quad [23]$$

De los triángulos rectángulos: $C_\theta Q C_1$, $C_1 S C_\theta$ y $G_0 P C_0$ extraemos los valores de: $C_1Q = yC_\theta \cdot \sin \hat{\theta}$; $C_1S = (zC_0 - zC_\theta) \cdot \cos \hat{\theta}$; por último, $RZ = PG = a \cdot \cos \hat{\theta}$; sustituyendo valores en (23), obtenemos:

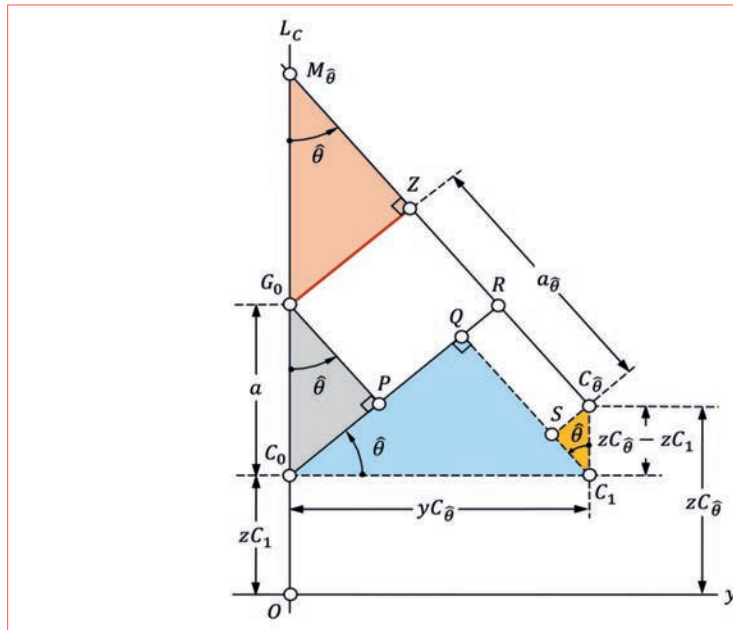


Fig. 5: Brazo de estabilidad dinámica.

$$a_\theta = yC_\theta \cdot \sin \hat{\theta} - (zC_\theta - zC_0) \cdot \cos \hat{\theta} + a \cdot \cos \hat{\theta} \quad [24]$$

Sustituimos (24) en (22) y ordenando,

$$BD = yC_\theta \cdot \sin \hat{\theta} - (zC_\theta - zC_0) \cdot \cos \hat{\theta} + a \cdot \cos \hat{\theta} - a \quad [25]$$

Derivando (25) respecto a la escora,

$$BD' = \frac{dyC_\theta}{d\theta} \cdot \sin \hat{\theta} + yC_\theta \cdot \cos \hat{\theta} - \frac{dzC_\theta}{d\theta} \cdot \cos \hat{\theta} + (zC_\theta - zC_0) \cdot \sin \hat{\theta} - a \cdot \sin \hat{\theta} \quad [26]$$

El movimiento vertical y transversal del centro de carena en función del radio metacéntrico es,

$$dy_\beta = R_\beta \cdot \cos \beta \cdot d\beta \quad dz_\beta = R_\beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta$$

Los valores de $dyC_\theta/d\theta$ y $dzC_\theta/d\theta$ en función del radio metacéntrico de la flotación isocarena de escora $\hat{\theta}$,

$$\frac{dyC_\theta}{d\theta} = R_\theta \cdot \cos \hat{\theta} \quad \frac{dzC_\theta}{d\theta} = R_\theta \cdot \sin \hat{\theta}$$

Sustituyendo ahora en la ecuación (21.26) y operando

$$BD' = R_\theta \cdot \cos \hat{\theta} \cdot \sin \hat{\theta} + yC_\theta \cdot \cos \hat{\theta} - R_\theta \cdot \sin \hat{\theta} \cdot \cos \hat{\theta} + (zC_\theta - zC_0) \cdot \sin \hat{\theta} - a \cdot \sin \hat{\theta}$$

$$BD' = yC_\theta \cdot \cos \hat{\theta} + (zC_\theta - zC_0) \cdot \sin \hat{\theta} - a \cdot \sin \hat{\theta} \quad [27]$$

Consideremos que, sobre el plano de inclinación transversal, donde $C_\theta M_\theta$ es el radio metacéntrico y $G_0 Z$ el brazo del par de fuerzas para una escora $\hat{\theta}$, establecemos la siguiente igualdad:

$$G_0 Z = C_0 Q + QR - C_0 P \quad [28]$$

De los triángulos rectángulos $C_0 Q C_1$, $C_1 S C_\theta$ y GPC_0 , deducimos los siguientes valores:

$$C_0 Q = yC_\theta \cdot \cos \hat{\theta}$$

$$QR = SC_\theta = (zC_\theta - zC_1) \cdot \sin \hat{\theta}$$

$$C_0 P = C_0 G_0 \cdot \sin \hat{\theta} = a \cdot \sin \hat{\theta}$$

Sustituyendo valores en (28)

$$G_0 Z = yC_\theta \cdot \cos \hat{\theta} + (zC_\theta - zC_1) \cdot \sin \hat{\theta} - a \cdot \sin \hat{\theta} \quad [29]$$

Como se observa, las ecuaciones (27) y (29) coinciden, es decir, se cumple que:

$$BD' = G_0 Z \quad [30]$$

Si ahora derivamos (30) respecto al ángulo de escora,

$$BD'' = \frac{dGZ}{d\hat{\theta}} = h_\theta \quad [31]$$

Es decir, la segunda derivada del brazo dinámico es igual a la altura metacéntrica generalizada, h_θ . Entonces, los brazos de estabilidad estática y dinámica dependen de los radios metacéntricos de las flotaciones isocarena, para la escora en la que se encuentren.

ÁNGULOS CRÍTICOS DE ESTABILIDAD

Todos los buques deben tener una estabilidad dinámica adecuada para determinados ángulos de escora, es decir, deben ser capaces de absorber cierta cantidad de energía externa sin escorarse más allá de un ángulo considerado como seguro. Debido a



Fuente: Fotokoopvaardij on WordPress.com

ello, la estabilidad dinámica es una exigencia que debe ser satisfecha, manteniendo los valores aconsejados para cada tipo de buque, por el estudio teórico del ingeniero y la experiencia del marino mercante.

Hay que tener presente que el equilibrio dinámico es instantáneo y no permanente, como es el equilibrio estático. La estabilidad dinámica facilita al marino mercante una idea muy real de la condición de estabilidad de un buque de superficie, dato no ofrecido por la estabilidad estática del mismo.

Para estudiar los ángulos críticos de estabilidad, vamos a suponer la acción de un viento que actúa de través sobre un buque que navega a una velocidad determinada. El viento está dibujado como un par escorante que varía con el coseno del ángulo de escora, a medida que aumenta el ángulo de escora, el brazo escorante disminuye, es decir, el brazo escorante depende del área proyectada sobre el plano diametral, a medida que el buque se escora, el área proyectada y el brazo escorante van disminuyendo.

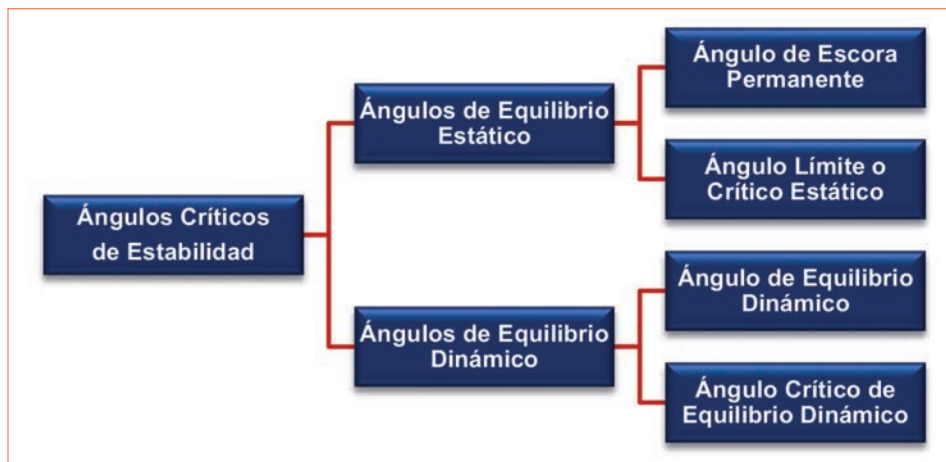


Diagrama - 1: Ángulos críticos estáticos y dinámicos.

En numerosas representaciones gráficas el brazo escorante es una línea recta de valor constante. Debido a ello, se origina una reserva de estabilidad menor, siendo por ello una opción más conservadora y real.

Ángulos de equilibrio estático

Supongamos un buque en equilibrio afectado por una escora permanente debida al viento. Sabemos que, a medida que aumenta el ángulo de escora, el brazo escorante disminuye. Nuestro objetivo es localizar los puntos de equilibrio estático donde se cumple que: la derivada de la energía cinética y la aceleración angular valen cero y, además, el brazo o par escorante es igual al brazo o par adrizante (fig.6).

- Punto de equilibrio estable. En el punto (A) o de equilibrio estable, se cumple que el brazo o par escorante es igual al brazo o par adrizante, el buque se encuentra afectado por una escora permanente generada por un fenómeno exterior que incide de forma constante sobre él. Aquí se cumple que la velocidad es máxima, siendo también máxima la energía cinética y mínima la energía potencial.

Como en esta posición, la derivada de la energía cinética vale cero, resultará

$$I_x \cdot \ddot{\alpha} = P_e - P_a \rightarrow \ddot{\alpha} = 0 \rightarrow P_e = P_a$$

La derivada segunda de la energía cinética en A es negativa por tratarse de una condición de máximo,

$$\frac{d(I_x \cdot \ddot{\alpha})}{d\theta} = \frac{dP_e}{d\theta} - \frac{dP_a}{d\theta} < 0 \rightarrow \frac{dP_e}{d\theta} < \frac{dP_a}{d\theta}$$

- Ángulo de escora permanente, de equilibrio estable o máximo teórico de escora. Representado como $\hat{\theta}_{Ep}$, es el ángulo de escora que coincide con el punto de equilibrio estable A, donde se igualan los brazos o momentos escorantes y adrizantes, verificándose el equilibrio estático o escora permanente. Si

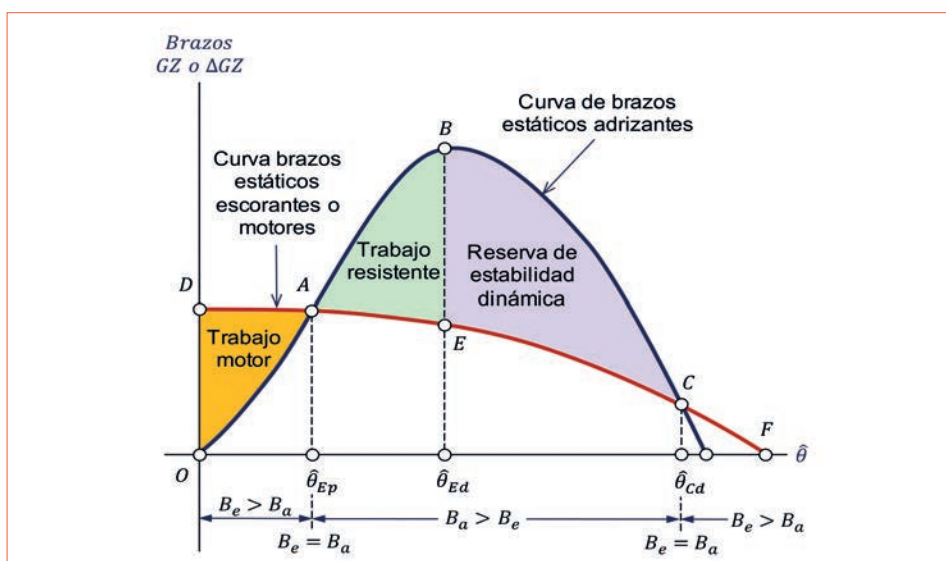


Fig. 6: Ángulos y puntos de equilibrio estático.

trabajamos con una curva de brazo, el ángulo de equilibrio estático se obtiene hallando el punto de corte entre la curva de brazos adrizantes y escorante. La energía o trabajo resistente absorbida por el buque, es decir, la estabilidad dinámica hasta ese punto viene representada por el área $OA\hat{\theta}_{Ep}O$.

- Ángulo crítico o límite de estabilidad. Representado como $\hat{\theta}_{Cd}$, se trata del ángulo originado por el segundo punto de intersección donde la curva del brazo escorante corta al brazo adrizante (punto C); es decir, su reserva de estabilidad vale cero ($P_e - P_a = 0$). Si el buque lo rebasara, su curva de brazos adrizantes será más pequeña que la curva de brazos escorantes, generándose una condición de equilibrio inestable, dando el buque la voltereta.

Ángulos de equilibrio dinámico

Sabemos que el viento que incide sobre un buque de superficie es una energía no un momento. Para localizar los puntos de equilibrio dinámico, debemos trabajar con las curvas de brazos dinámicos adrizantes y escorantes, justo donde ambas curvas se crucen será donde estos se encuentren (fig.7).

Las curvas de brazos dinámicos adrizantes y escorantes son las integrales de las curvas de brazos estáticos adrizante y escorante con respecto al ángulo de escora. Si estas dos funciones se cruzan es porque las dos integrales mencionadas se igualan. Lo indicado únicamente se cumple en los puntos de equilibrio dinámico G y H (cruce de las curvas) donde resulta que

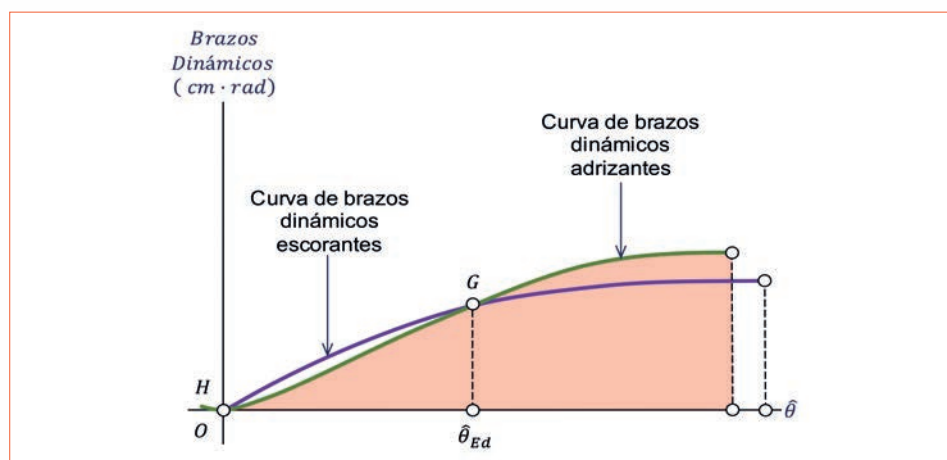


Fig. 7: Curvas de brazos dinámicos escorantes y adrizantes

$$\int_{\theta_e}^{\Phi} P_e \cdot d\theta = \int_{\theta_e}^{\Phi} P_a \cdot d\theta \quad [32]$$

Conclusión: se trata de una condición necesaria pero no suficiente. Para que el buque sea capaz de recuperarse tiene que ocurrir que el par adrizante sea mayor que el par escorante ($P_a > P_e$).

- Punto de equilibrio dinámico estable. Representado como G , es el punto a partir del cual los brazos dinámicos adrizantes son mayores que los brazos dinámicos escorantes, es decir, la curva de brazos dinámicos adrizante esta por encima de la curva de brazos dinámicos escorantes. La abscisa de este punto de corte será donde se encuentra el ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$.
- Punto de equilibrio dinámico no estable. Identificado como H , es el punto a partir del cual los brazos dinámicos escorantes superan a los brazos dinámicos adrizantes, es decir, la curva de brazos dinámicos adrizante está por debajo de la curva de brazos dinámicos escorantes.
- Ángulo de equilibrio dinámico o ángulo máximo práctico o real. Es el ángulo de escora máxima $\hat{\theta}_{Ed}$ que alcanza un buque debido al efecto de una fuerza exterior (mar o viento) que actúa sobre él. En el punto donde se origina, la energía cinética y la velocidad angular de balance se anulan por ser iguales quedando el buque parado unos instantes (la energía absorbida por el buque es igual a la energía gastada por el viento); es decir, para este ángulo de escora se anula la velocidad y fuerza viva del buque, siendo el valor del par adrizante igual a la reserva de estabilidad. El sumatorio de las energías con su signo correspondiente, que actúan sobre el buque, será igual a cero.

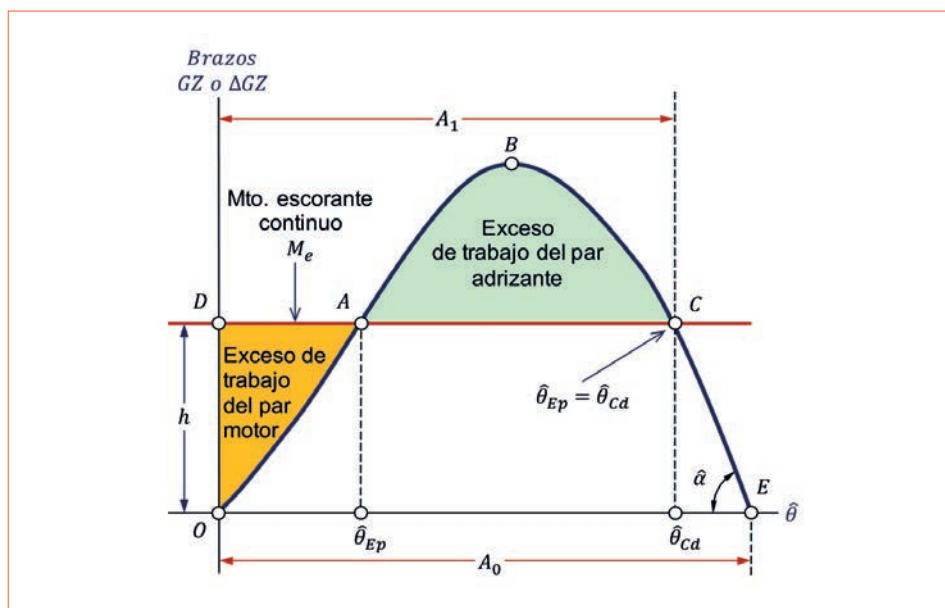


Fig. 8: Momento máximo escorante y ángulo crítico.

Este ángulo se obtiene trabajando con las “curvas dinámicas adrizante y escorante”, siendo el ángulo buscado la abscisa del punto de corte entre ambas (fig.7). Su cálculo resulta importante para comprobar que su valor no sobrepasará el ángulo crítico de equilibrio dinámico, en caso de hacerlo, el buque zozobrará; también puede zozobrar el buque en el caso de ser el ángulo de inundación progresiva inferior al ángulo crítico⁶.

- Ángulo crítico de equilibrio dinámico. Este ángulo se origina cuando el ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$ coincide con el ángulo crítico o límite de estabilidad $\hat{\theta}_{Cd}$, debido a ello, los pares adrizante y escorante son iguales, pero ante el mínimo incremento de la escora, el buque entrará en la zona de reserva de estabilidad negativa dando la voltereta.

En la (fig.8), hemos representado el ángulo crítico de estabilidad dinámica $\hat{\theta}_{Cd}$, la reserva de estabilidad dinámica o exceso de trabajo del par adrizante, área ABC , y un momento escorante continuo o constante M_e (línea recta DC), que corta la curva de

estabilidad estática transversal en los puntos A y C .

El punto C , representa al segundo punto de corte de la curva de brazos escorantes con la curva de estabilidad estática del buque, ofreciéndonos el ángulo crítico de estabilidad dinámica, ya que, a partir de él no existe brazo adrizante que pueda generar un momento resistente a la escora que el buque alcanza. Además, las áreas OAD y ABC son iguales y la parte final de la curva de estabilidad estática transversal mantiene una pendiente pronunciada CE , pudiéndose sustituir por una recta, sin error.

En este caso, la reserva de estabilidad (zona verdosa) será igual al área comprendida entre la curva de brazos escorantes y la curva de estabilidad estática (zona anaranjada), equivalente a la diferencia entre los momentos escorantes y adrizantes hasta alcanzar el ángulo de equilibrio estático. Por ello, el área de la curva de estabilidad estática será igual al área del trapecio $ODCE$. En el triángulo rectángulo $C\hat{\theta}_{Cd}E$ se cumple que:

6.- El ángulo de inundación progresiva θ_f o θ_i , es el ángulo de escora a partir del cual la superficie de la mar alcanza la parte más baja de la primera abertura considerada como no estanca del buque, a partir de aquí, se puede producir una inundación progresiva. Este ángulo depende del desplazamiento, de la coordenada vertical del centro de gravedad del buque y de su asiento o trimado. Se considera abertura a toda comunicación del exterior con dichos espacios, tubos de venteo, tambuchos, ventilaciones o aberturas en general, aunque cuenten con mecanismo de cierre estanco a la intemperie. La regulación internacional considera que a partir de este ángulo de escora el buque pierde toda su capacidad adrizante, por lo que exige que las curvas de brazos adrizantes GZ se interrumpan a partir de ese punto y se continúen con brazo discontinuo.

$$\tan \hat{\alpha} = \frac{h}{A_0 - A_1} \rightarrow h = (A_0 - A_1) \cdot \tan \hat{\alpha}$$

$$A = \frac{A_0 + A_1}{2} h = \frac{A_0 + A_1}{2} \cdot (A_0 - A_1) \cdot \tan \hat{\alpha} = \frac{A_0^2 - A_1^2}{2} \cdot \tan \hat{\alpha} \rightarrow 2A = A_0^2 \cdot \tan \hat{\alpha} - A_1^2 \cdot \tan \hat{\alpha}$$

$$A_1^2 = \frac{A_0^2 \cdot \tan \hat{\alpha}}{\tan \hat{\alpha}} - \frac{2A}{\tan \hat{\alpha}} = A_0^2 - \frac{2A}{\tan \hat{\alpha}} \rightarrow \sqrt{A_1^2} = \sqrt{A_0^2 - \frac{2A}{\tan \hat{\alpha}}} \rightarrow A_1 = \sqrt{A_0^2 - \frac{2A}{\tan \hat{\alpha}}}$$

$$h = \left(A_0 - \sqrt{A_0^2 - \frac{2A}{\tan \hat{\alpha}}} \right) \cdot \tan \hat{\alpha}$$

[33]

CURVA DE BRAZOS ADRIZANTES O DIAGRAMA ESTÁTICO

El Código Internacional de Estabilidad sin Averías, 2008 (Código IS 2008), considera al buque sometido a una presión de viento constante que actúa perpendicularmente al plano de crujía, lo que da como resultado el correspondiente brazo escorante. Debido a ello, además de considerar al brazo escorante como constante también toma una reserva de estabilidad menor, por tanto, estamos ante una opción más conservadora que la real.

En la (fig. 9), se cumple que:

- 1) En el punto A, el equilibrio resulta ser estable, por ser la pendiente de la curva adrizante positiva. Si proyectamos este punto sobre el eje de abscisas se obtiene el ángulo de escora permanente, $\hat{\theta}_{Ep}$. A partir del punto A, el brazo adrizante es mayor que el brazo escorante, antes del punto A, era al revés.
- 2) En el punto C, el equilibrio es inestable siendo un punto crítico. Al proyectarlo sobre el eje de las abscisas hallamos el ángulo crítico, $\hat{\theta}_{Cd}$. Una vez superado el punto C, el equilibrio se convierte en inestable siendo los brazos escorantes mayores que los adrizantes.

Para obtener los puntos de equilibrio en la curva de estabilidad estática, vamos a suponer un buque en navegación afectado por un par escorante, que consideramos constante, por haber alcanzado un equilibrio estático estable con una escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$. Como en realidad el brazo escorante varía con el coseno, por depender

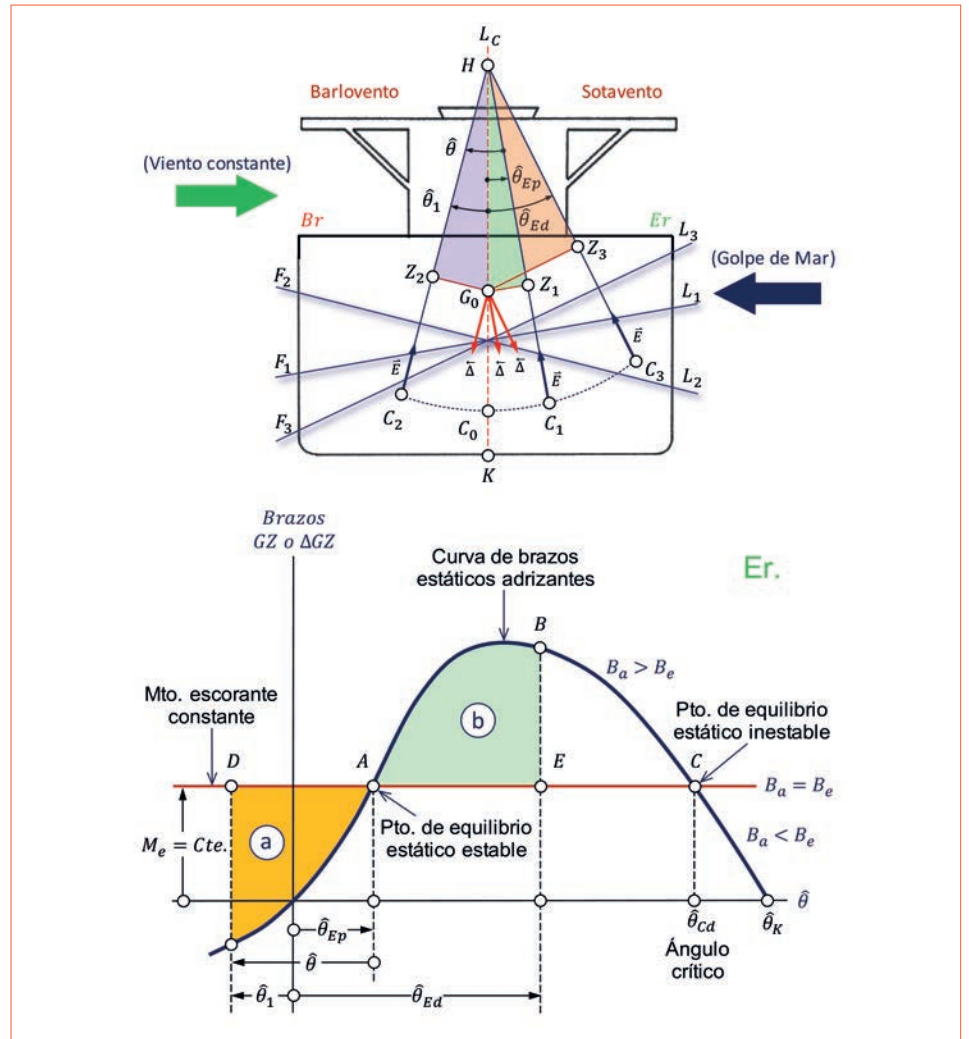


Fig. 9: Curva de estabilidad estática.

del área proyectada sobre el plano diametral, a medida que el buque se escora el área proyectada se hace menor, por esta razón, el brazo escorante también se reduce (aquí estamos ante una energía no un momento).

Nuestro buque se encuentra en el punto A con un ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$ a sotavento de-

bido a la presencia de un viento constante. En un instante cualquiera y por sotavento, el buque es golpeado por la mar, generándose instantáneamente un movimiento de balance que lo escora hacia barlovento un determinado ángulo, una vez alcanzado este punto los momentos escorante y adrizante tienen el mismo signo, razón por la cual sus energías se suman.

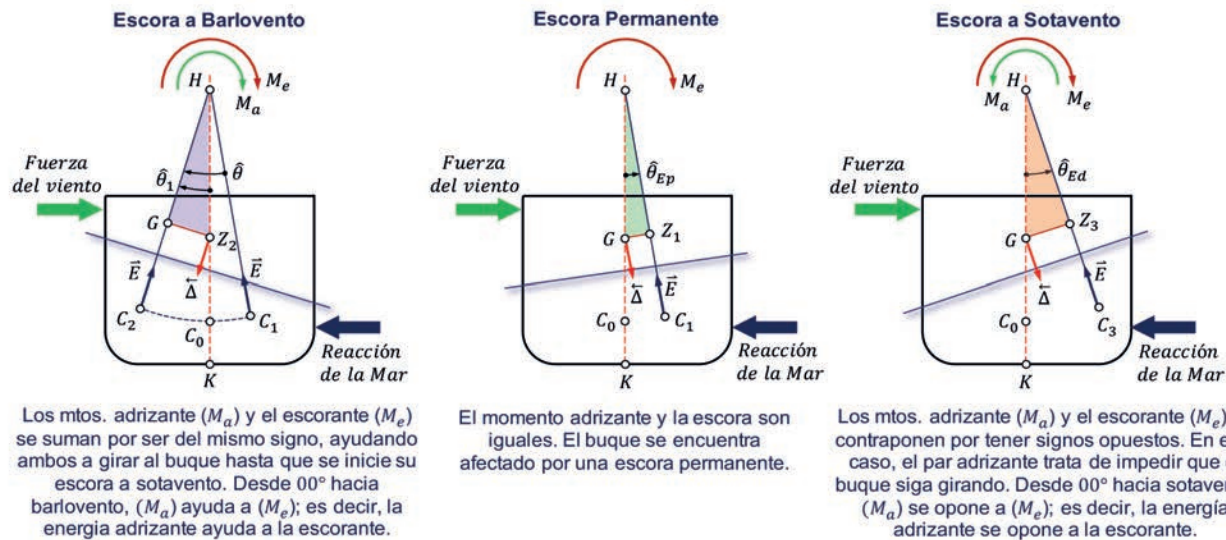


Fig. 10: Momento escorante y adrizante debidos a un viento constante.

A continuación, el buque comienza a recuperarse progresivamente iniciando su escora hacia sotavento, aún con mayor fuerza, pasando por la línea de crujía (plano diametral) donde el par adrizante cambiará de sentido oponiéndose progresivamente al momento escorante, el par adrizante tratará de impedir que el buque continúe girando, parándose al alcanzar el valor máximo del ángulo de escora a sotavento o ángulo de equilibrio dinámico o máximo $\hat{\theta}_{Ed}$ debido al golpe de mar recibido; este movimiento continuará progresivamente, pero debido a diferentes efectos que actúan sobre el buque, irá amortiguándose hasta detenerse en la posición de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$.

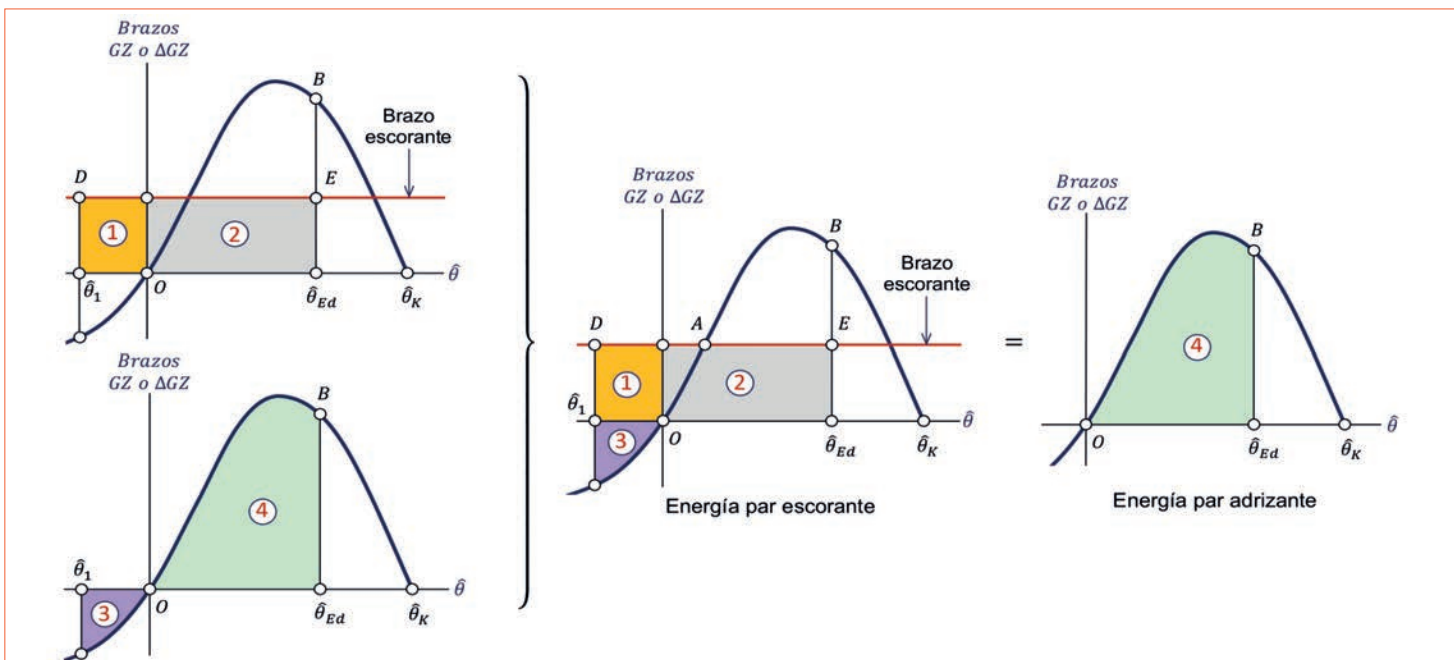
La condición por imponer es la siguiente: “el trabajo del par escorante T_E debe ser igual al trabajo del par adrizante T_A ”,

$$\left. \begin{aligned} T_E &= \int_{\theta_1}^{\theta_{Ed}} M_e \cdot d\theta + \int_{\theta_1}^0 \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \\ T_A &= \int_0^{\theta_{Ed}} \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \end{aligned} \right\} \rightarrow \int_{\theta_1}^{\theta_{Ed}} M_e \cdot d\theta + \int_{\theta_1}^0 \Delta \cdot GZ \cdot d\theta = \int_0^{\theta_{Ed}} \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \quad [34]$$

Como en este caso el momento escorante M_e es constante, escribimos:

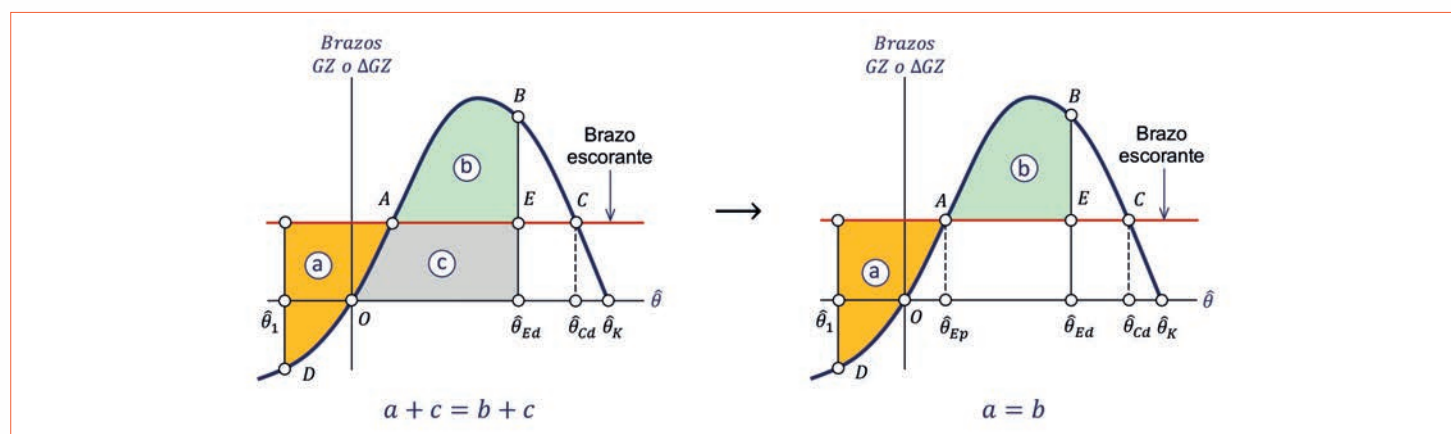
$$\underbrace{M_e [0 \cdot \hat{\theta}_1]}_{(1)} + \underbrace{M_e [\hat{\theta}_D \cdot 0]}_{(2)} + \underbrace{\int_{\theta_1}^0 \Delta \cdot GZ \cdot d\theta}_{(3)} = \underbrace{\int_0^{\theta_D} \Delta \cdot GZ \cdot d\theta}_{(4)} \quad [35]$$

Las integrales de la ecuación (34), en la curva de estabilidad estática, vienen representadas por áreas. Si ahora llamamos a cada sumando como se ha indicado en (35), veamos gráficamente lo que sucede:



Energías de igual signo (1, 2, 3) y de signo contrario (4). El trozo $OAE\hat{\theta}_{Ed}$ es común para las energías escorante y adrizante

Superponiendo ambos miembros de la igualdad, quedará



Cuando las áreas a y b sean iguales, el buque se quedará parado sin energía alcanzado su ángulo máximo dinámico; a partir de aquí, da comienzo el balance nuevamente hasta que gradualmente se amortigua volviendo a su ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$. Esta igualdad de áreas relativa es otra forma de expresar la condición de equilibrio dinámico.

En la figura tenemos: El área c , se autoanula por compensarse. El área a , representa la energía neta que tiende a hacer escorar el buque. Por último, el área b , representa la energía efectiva adrizante, es decir, la parte de la reserva de estabilidad que se utiliza para contrarrestar la energía escorante a .

Nos queda estudiar la condición conocida como “*situación crítica*” que se produce cuando el área b abarca toda la reserva de estabilidad, en este caso el punto B coincide con el punto de equilibrio inestable C , a partir del cual el buque zozobraría ($\hat{\theta}_{Ed} = \hat{\theta}_{Cd}$). Como ya se ha indicado, el buque puede zozobrar antes, justo al producirse el ángulo de inundación progresiva, $\hat{\theta}_f$, que suele ser inferior al ángulo crítico de equilibrio dinámico.

Finalmente destacamos que, los diagramas estáticos (momentos o brazos), utilizados sin combinación con los diagramas dinámicos, ofrecen la ventaja de poder obtener de forma inmediata los puntos de equilibrio estático o el ángulo de escora permanente. Por el contrario, el cálculo del ángulo de equilibrio dinámico presenta el inconveniente de ser muy difícil.

CURVA O DIAGRAMA DE BRAZOS DINÁMICOS

Habitualmente trabajamos con brazos dinámicos (integral de brazos estáticos adrizantes), en lugar de pares o momentos,

$$BD_{\hat{\theta}} = \int_{\theta_0}^{\hat{\theta}} \overline{GZ} \cdot d\theta \quad [36]$$

En un buque adrizado se cumple que: $\hat{\theta}_0 = 0$ y en otro afectado por una escora permanente, $\hat{\theta}_0 = \hat{\theta}_{Ep}$; entonces, para un ángulo de escora cualquiera $\hat{\theta}$, el brazo dinámico estará representado por el área encerrada por la curva de brazos adrizantes GZ hasta dicho ángulo.

El diagrama dinámico, no es más que la representación gráfica de la estabilidad dinámica o del brazo dinámico, en función del ángulo de escora $\hat{\theta}$. Así pues, el área de la curva de brazos adrizantes GZ hasta un ángulo de escora $\hat{\theta}$, estará representada por una simple ordenada de color rojo en la curva de brazos dinámicos para dicha escora (fig.11).

La función brazo dinámico se obtiene integrando los estáticos, la relación inversa también se cumple, los brazos adrizantes se corresponden con la representación de la derivada de la función de brazos dinámicos,

$$\frac{dBD}{d\theta} = \overline{GZ} \quad \frac{d^2BD}{d\theta^2} = \frac{d\overline{GZ}}{d\theta}$$

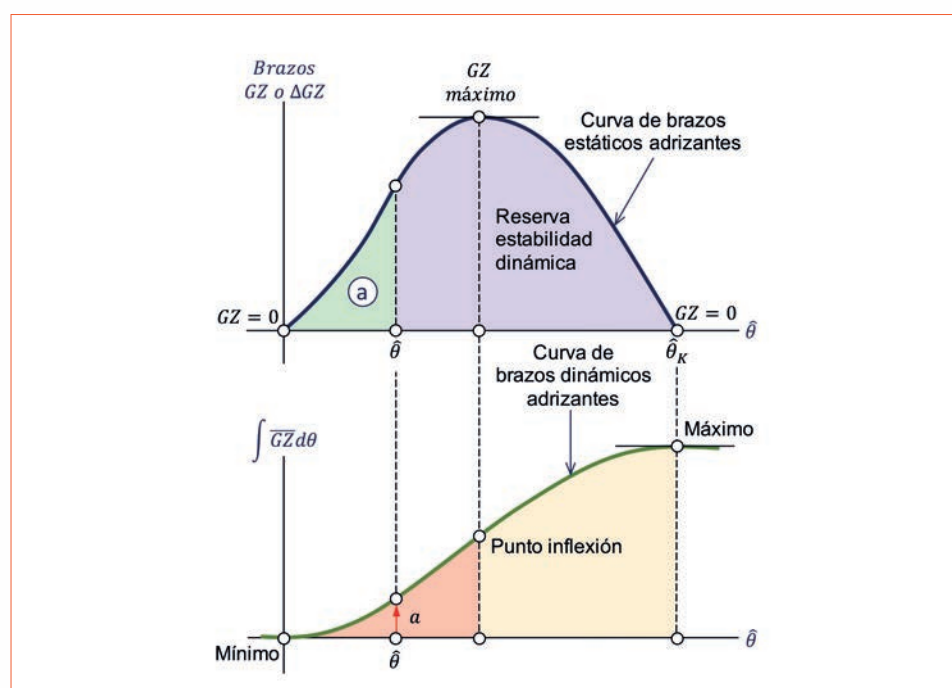


Fig. 11: Diagramas estático y dinámico.

En el origen tenemos: $\left. \begin{aligned} \overline{GZ} &= 0 = \frac{d\overline{BD}}{d\theta} \\ \frac{d\overline{GZ}}{d\theta} &= \frac{d^2\overline{BD}}{d\theta^2} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{en la curva de estabilidad dinámica hay un mínimo.}$

En $\overline{GZ}$ máximo, se cumple: $\left. \begin{aligned} \frac{d\overline{GZ}}{d\theta} &= \frac{d^2\overline{BD}}{d\theta^2} = 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{en la curva dinámica existe un punto de inflexión.}$

En el ángulo límite: $\left. \begin{aligned} \overline{GZ} &= 0 = \frac{d\overline{BD}}{d\theta} \\ \frac{d\overline{GZ}}{d\theta} &= \frac{d^2\overline{BD}}{d\theta^2} < 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{en la curva dinámica hay un máximo.}$

Sabemos que, $\overline{GZ} = d\overline{BD}/d\theta$; esto significa que dos puntos diferentes que tengan el mismo brazo estático, en estabilidad dinámica tendrán la misma derivada, y en la representación gráfica del diagrama dinámico la misma pendiente en sus tangentes. Debido a ello,

- Dos puntos distintos A y B , en los que $\overline{GZ}_A = \overline{GZ}_B$, en la curva de brazos dinámicos sus rectas tangentes tendrán la misma pendiente, por lo que, ambas serán paralelas.
- En la condición de equilibrio estático con un brazo escorante, $\overline{GZ}_A = B_{eA}$, en el diagrama dinámico significa únicamente que, para el ángulo correspondiente, la tangente a las curvas de brazos dinámicos adrizantes y de brazos dinámicos escorantes son paralelas, contarán con la misma derivada y no se cortan.

Resulta importante considerar que, en el diagrama estático, para obtener los puntos que cumplan con una determinada condición tenemos que averiguar para qué ángulo obtenemos la igualdad de áreas. En el diagrama dinámico, esta condición de equilibrio viene dada por una igualdad de ordenadas, lo que resulta mucho más fácil.

En la (fig.12) tenemos dibujadas las curvas estática y dinámica de un buque adrizado, al que sometemos de pronto a un momento o brazo escorante constante producido por un agente exterior (p.e. viento). En el diagrama estático, el momento o brazo constante esta representado mediante una recta horizontal de color rojo; en el diagrama dinámico, el trabajo de este momento o brazo constante es,

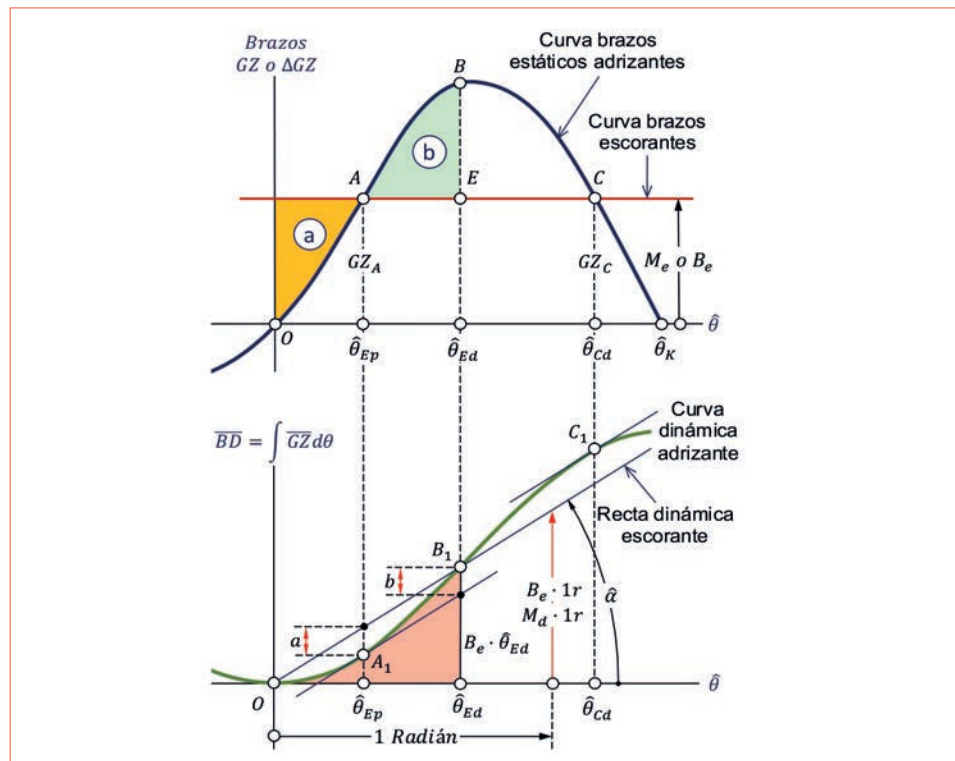


Fig. 12: Ángulos de equilibrio dinámico.

$$T_R = \int_0^{\theta} M_{to} \cdot d\theta = M_{to} \cdot \hat{\theta} \quad [37]$$

Hemos obtenido la ecuación de una recta que pasa por el origen, cuya pendiente es,

$$\frac{dT_R}{d\theta} = M_{to} = \tan \hat{\alpha} \quad [38]$$

Como sabemos, el M_{to} cuenta con unidades (toneladas por metro), mientras que $\tan \hat{\alpha}$, es adimensional. Esto supone que, aunque M_e y M_d físicamente son lo mismo $M_e = M_d = M_{to}$, su representación gráfica variará según los diferentes factores de escala empleados en los diagramas estáticos y dinámicos, que a su vez son arbitrarios.

Los pasos que se deben seguir para desarrollar el proceso gráfico que nos ocupa, son los siguientes:

- 1) Cálculo del ángulo $\hat{\alpha}$ en el diagrama dinámico. Por el punto donde $\hat{\theta}=1$ radián levantamos una ordenada $M_d \cdot 1$ radián o $B_e \cdot 1$ radián, cuyo extremo superior se une con el punto origen generándose el ángulo $\hat{\alpha}$ entre la recta trazada (recta dinámica escorante) y el eje de abscisas. Con el valor de $\hat{\alpha}$, conocemos ya la pendiente que nos permitirá buscar las distintas tangentes geométricas que necesitamos.
- 2) Cálculo de los puntos de equilibrio estático A_1 y C_1 usando únicamente el diagrama dinámico. La condición que se debe imponer es la siguiente:

$$\overline{GZ}_A = \overline{GZ}_C = BD = \frac{d\overline{BD}}{d\theta} = \tan \hat{\alpha}$$

Como resulta que A_1 y C_1 tienen la misma derivada, sus rectas tangentes deben tener la misma pendiente, siendo la solución gráfica la siguiente: en primer lugar y siguiendo el proceso indicado, deducimos el valor del ángulo $\hat{\alpha}$, seguidamente se localizan los puntos A_1 y C_1 de la curva dinámica cuya recta tangente tenga la pendiente α (rectas paralelas).

- 3) Cálculo del punto de equilibrio dinámico B_1 . Para hallar este punto, en el diagrama imponemos la siguiente condición: “el trabajo escorante es igual al trabajo adrizante” o “el brazo dinámico escorante es igual al brazo dinámico adrizante”, esto representa la igualdad de ambas áreas absolutas en el diagrama estático. En el punto de equilibrio dinámico B_1 , es donde los valores de los brazos estáticos y dinámicos se igualan, $BD_{B1} = B_e \cdot \hat{\theta}_{Ed}$.

- 4) Cálculo de las áreas a y b del diagrama estático con el diagrama dinámico. En un principio, se deben conocer los valores del ángulo $\hat{\alpha}$ y la recta dinámica escorante. Seguidamente calculamos el punto A_1 mediante una recta que sea tangente al diagrama dinámico y paralela a la recta dinámica escorante. El valor del área “ a ” del diagrama estático se representa por un segmento de ordenada que va desde la vertical del punto A_1 hasta la recta dinámica escorante; el valor del área “ b ” es el segmento de ordenada que va desde la recta tangente al diagrama dinámico en el punto A_1 hasta la recta dinámica escorante.

Conclusión: El diagrama dinámico es impreciso a la hora de determinar los puntos de equilibrio estático, siendo por ello un problema importante. Por otro lado, cuenta con la ventaja de que para encontrar el punto que cumpla con una condición determinada de equili-

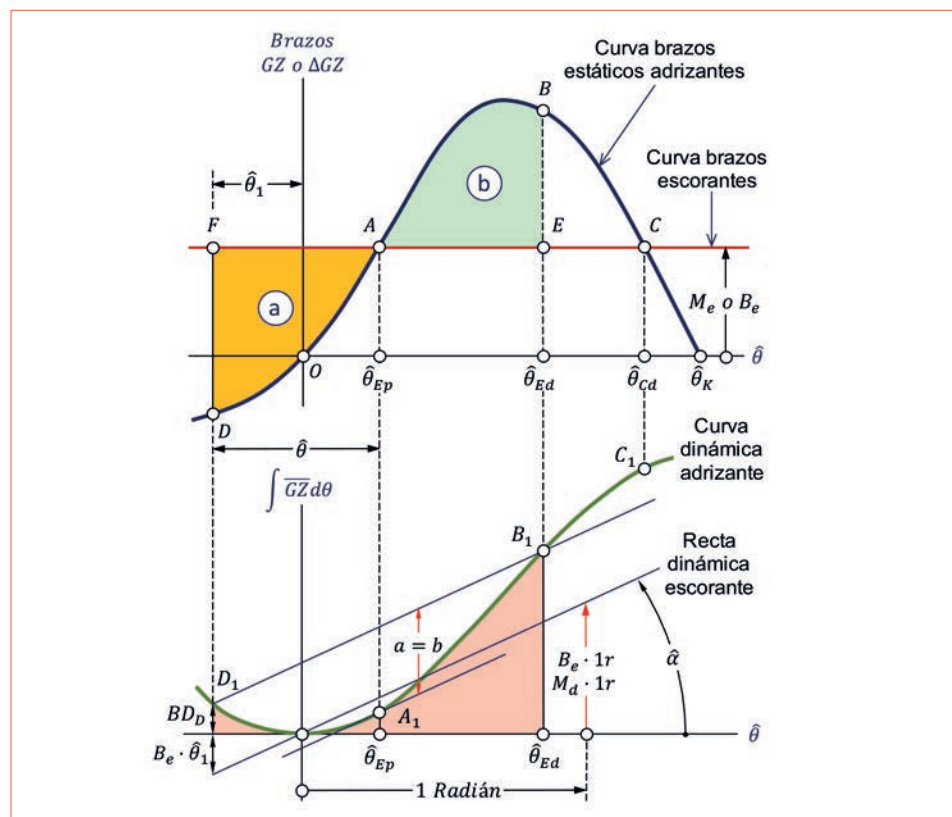


Fig. 13: Ángulo máximo de escora al recuperar a sotavento.

brio, únicamente hay que localizar una ordenada.

Estudiemos ahora el caso siguiente: Nuestro buque se encuentra afectado por un momento escorante constante⁷, dicho esto, vamos a suponer que, a partir del punto de escora permanente, se produce un balance o bandazo de $\hat{\theta}$ grados a barlovento. En esta situación, vamos a calcular el ángulo de escora máximo práctico que alcanzará el buque al recuperar a sotavento (fig.13).

Para resolver el problema, vamos a utilizar los diagramas estáticos y dinámicos simultáneamente, siendo el procedimiento de cálculo el siguiente:

- 1) En el diagrama estático, trazamos la recta de altura M_e o B_e paralela al eje de abscisas (brazo escorante constante), que produce los puntos de corte A y C , con sus respectivos ángulos $\hat{\theta}_{Ep}$ y $\hat{\theta}_{Cd}$ (escora permanente y crítico o límite).
- 2) Trasladamos los ángulos $\hat{\theta}_{Ep}$ y $\hat{\theta}_{Cd}$

al diagrama dinámico y definimos los puntos A_1 y C_1 .

- 3) Como el ángulo de balance a barlovento $\hat{\theta}$ es dato del problema, podemos determinar los puntos D y D_1 en ambos diagramas.
- 4) Calculamos el ángulo $\hat{\alpha}$ en el diagrama dinámico operando de la forma ya conocida.
- 5) El punto A_1 se encuentra situado sobre la vertical del ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$. Por este punto, trazamos la recta de pendiente $\tan \hat{\alpha}$ (paralela a la recta dinámica escorante), y que además tendrá que ser tangente a la curva de estabilidad dinámica en dicho punto.
- 6) Por el punto D_1 , que hemos obtenido a partir del ángulo de balance $\hat{\theta}$ o $\hat{\theta}_1$, trazamos otra línea recta paralela a las dos anteriores.
- 7) El punto de intersección de la recta anterior con la curva de estabilidad dinámica B_1 , al ser

7.- El brazo escorante disminuye con la escora que toma el buque porque el área perpendicular, sobre la que está actuando, es menor. Si consideramos que el brazo escorante es constante, lo que estamos realizando es un cálculo más conservador que el real, con una reserva de estabilidad menor que la real.

un pozo de energía potencial según su definición física⁸.

- En el punto origen, por encontrarse el buque adrizado, se cumple: $GZ_0 = 0$, $\hat{\theta}_0 = 0$, $BD_0 = 0$ (existe un extremo). A la izquierda del origen la función es decreciente, brazos dinámicos negativos, el signo de la primera derivada también es negativo, implicando ello que los brazos dinámicos decrecen generando, en el origen de la curva dinámica, un mínimo por ser tangente la curva al eje de abscisas. A la derecha del origen (punto de partida de la curva de brazos adrizantes), la función es creciente por ser su derivada positiva.

- Entre el origen y el ángulo de escora $\hat{\theta}_d$, los brazos estáticos son positivos, por lo que la primera derivada del brazo dinámico será también positiva y, la función brazo dinámico será creciente.
- En el punto *A*, el brazo adrizante alcanza su máximo valor positivo para un ángulo de escora a estribor $\hat{\theta}_d$. Aquí, el brazo dinámico tiene un punto de inflexión por cumplirse que: $BD'' = GZ'_{mx} = 0$ (la derivada del brazo adrizante GZ es igual a cero). Como el brazo adrizante GZ , es la derivada de los brazos dinámicos, entonces si la derivada primera de GZ vale cero, la segunda derivada de los brazos dinámicos también será cero. Matemáticamente, se trata de un punto de inflexión de la curva de estabilidad dinámica (punto *D*), como puede comprobarse a simple vista en la figura de referencia.
- Cuando hablamos de los ángulos límites o alcance de estabi-

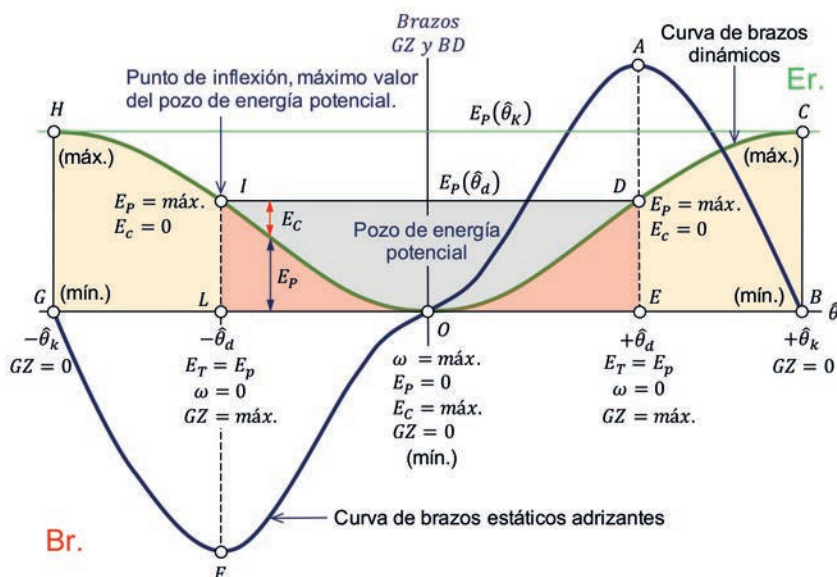


Fig. 15: Buque adrizado con altura metacéntrica positiva.

lidad estática (puntos de fuga), nos referimos a los puntos *B* y *G* ($\pm\hat{\theta}_k$), donde la curva de brazos estáticos adrizantes corta al eje de abscisas ($GZ = 0$). En ambos puntos, el brazo dinámico positivo o negativo alcanza su valor máximo⁹. Antes de estos puntos, la función del brazo dinámico es creciente por ser positivos los brazos estáticos, pero una vez superados los mismos, los brazos estáticos se vuelven negativos obligando a los brazos dinámicos a decrecer, no siendo el buque capaz de recuperar su posición inicial de adrizamiento.

- La diferencia entre el origen y el ángulo de alcance o límite positivo de estabilidad a estribor $+\hat{\theta}_k$, radica en que, a partir del origen, el buque cuenta con brazos estáticos adrizantes que se oponen a los escorantes, siendo capaz de recuperar su posición de adrizado. A partir del punto *B*, la curva de brazos adrizantes se vuelve negativa, el par adrizante no se opone al

escorante ya que actúan ambos en el mismo sentido originando una pérdida total de estabilidad en el buque.

- Entre el origen y el ángulo de alcance o límite negativo de estabilidad a babor $-\hat{\theta}_k$, los brazos estáticos son negativos, siendo la primera derivada de los brazos dinámicos también negativa, ello implica que, los brazos dinámicos disminuyen y como las pendientes de los brazos estáticos son positivas en este intervalo, la curva decrece con la concavidad hacia arriba (simétrica a la otra)¹⁰.
- En el punto *F*, el brazo adrizante alcanza su máximo valor negativo para un ángulo de escora a babor $-\hat{\theta}_d$, la curva dinámica presenta un punto de inflexión, ya que, para dicho ángulo la segunda derivada del brazo dinámico es igual a cero. Efectivamente, entre los ángulos alcance o límite y crítico, ambos a babor, los brazos estáticos siguen siendo negativos, entonces

8.- Un pozo de energía potencial es la región que rodea un mínimo local de energía. La energía capturada en un pozo de potencial no es posible convertirla en otro tipo de energía (energía cinética en el caso de un potencial gravitatorio) debido a que se encuentra en un mínimo local de la energía potencial. Por tanto, un cuerpo no puede proseguir hasta un mínimo global de la energía potencial, como tendería de forma natural debido a la entropía (evolución o transformación).

9.- Si la derivada de una función es igual a cero, significa que tenemos un máximo o un mínimo. En el punto $+\hat{\theta}_k$ se produce un máximo ya que, a su izquierda la función del brazo dinámico crece por ser positivos los brazos estáticos, y a su derecha la función del brazo dinámico decrece por ser los brazos estáticos negativos. En el punto $+\hat{\theta}_k$ vuelve a presentarse un máximo ya que a la derecha los brazos estáticos son menores que cero (negativos) y a la izquierda son mayores que cero (positivos).

10.- Se dice que la gráfica de una función f es cóncava hacia arriba en un intervalo A , si $f'(x)$ es creciente sobre A . Si $f'(x)$ es decreciente sobre A entonces se dice que la gráfica de f es cóncava hacia abajo. Importante: cuando la concavidad se acerca hacia el eje $0x$ se denomina cóncava hacia arriba, en el caso de alejarse de dicho eje se denomina cóncava hacia abajo.

resulta que, la función del brazo dinámico en dicho intervalo se mantiene decreciente con la concavidad hacia abajo.

- En los puntos *C* y *H*, la curva de brazos dinámicos presenta un punto máximo de inflexión por ser la función antes del punto creciente y después del mismo decreciente; además, estos puntos coinciden con los ángulos de alcance o límites estáticos tanto a babor como a estribor.

En este caso, el movimiento del buque solo es posible entre los ángulos de escora $-\hat{\theta}_d$ y $+\hat{\theta}_d$. En la región marcada de color amarillo (fig.15), el movimiento no será posible por ser la energía dinámica o potencial mayor que la total ($E_D > E_T$). Entonces resultará que:

- En el ángulo de escora $-\hat{\theta}_d$, la energía cinética vale cero, por ser iguales las energía total y potencial $E_T(-\hat{\theta}_d) = E_P(-\hat{\theta}_d)$, debido a ello, el buque estará en reposo instantáneo o equilibrio dinámico, ya que, en dicha inclinación, el brazo del par de estabilidad no vale cero, por actuar un momento adrizante que obliga al buque a moverse hacia la posición de adrizado. Lógicamente, en este punto la velocidad angular vale también cero.
- A partir de $-\hat{\theta}_d$, la energía potencial o dinámica comienza a decrecer progresivamente aumentando de igual manera la energía cinética y la velocidad angular.
- A medida que nos vamos acercando a la posición de adrizado (punto *O*), el buque va perdiendo energía potencial de estabilidad, convirtiéndola en energía cinética de movimiento de tal manera que, la suma de ambas energías siempre nos facilite el mismo total.
- Cuando el buque alcance su posición de adrizado, habrá



Fuente: <https://www.dreamstime.com/photos-images/storm-vessel.html>

convertido toda la energía potencial de estabilidad en energía cinética de movimiento, logrando el valor máximo de la velocidad angular.

- A partir del punto origen (buque adrizado), empezará a reconvertir la energía cinética en energía potencial de estabilidad hasta llegar, si no hay rozamiento, a la inclinación simétrica $+\hat{\theta}_d$, donde quedará parado y en equilibrio dinámico para, unos segundos después, reiniciar su movimiento

hacia la banda contraria debido al par de estabilidad¹¹.

- 2) Buque adrizado con altura metacéntrica negativa (fig.16). Es importante tener presente que, siempre que el centro de gravedad del buque se encuentre en el plano diametral o de crujía, la función brazo estático es una función impar y se demuestra que la integral de una función de este tipo resulta ser una función par, siendo definida simétricamente respecto del eje de ordenadas y viceversa.

11.- En esta condición de carga, actúa únicamente el brazo del par estático transversal cuyo movimiento será oscilatorio entre dos posiciones simétricas del plano de crujía con velocidad angular variable.

- En el punto origen el brazo estático vale cero, la primera derivada del brazo dinámico también vale cero, esto implica que, el brazo dinámico es máximo, por ser a la izquierda del origen el brazo estático positivo y a la derecha negativo.
- Entre el punto origen y el ángulo de tumba $\hat{\theta}_t$, los brazos estáticos son negativos, debido a ello, los brazos dinámicos disminuyen. Justo a la derecha del ángulo de tumba $\hat{\theta}_t$, los brazos dinámicos crecen y a la izquierda disminuyen; debido a ello, en $\hat{\theta}_t$ la función brazo dinámico genera un mínimo de valor nulo.

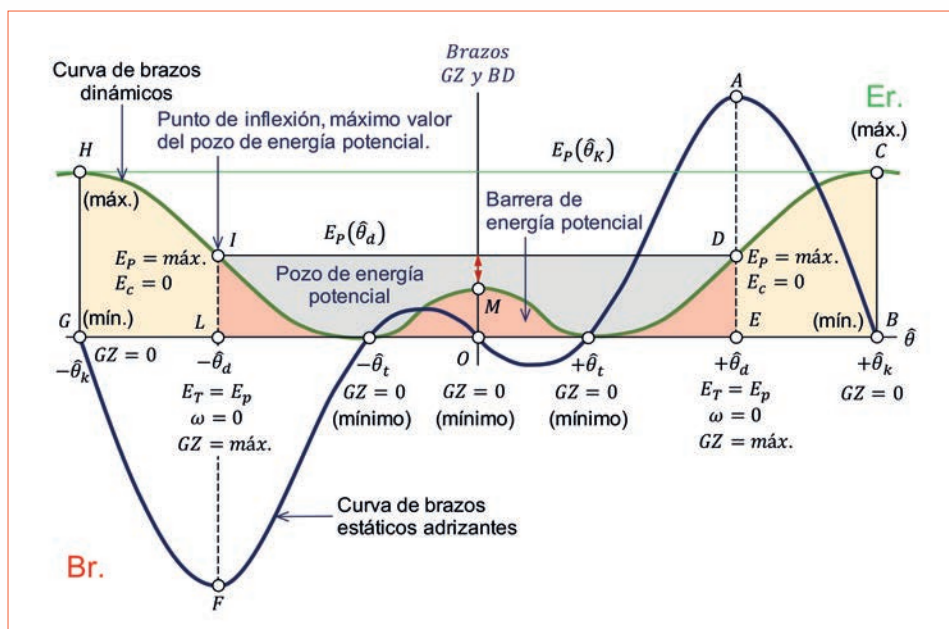


Fig. 16: Buque adrizado y altura metacéntrica negativa.

- Entre el ángulo de tumba y el valor máximo del GZ, los brazos estáticos son positivos y la primera derivada del brazo dinámico también. Debido a ello, la función brazo dinámico es creciente. Además, la altura metacéntrica es positiva y la segunda derivada del brazo dinámico es mayor que cero, por lo que la concavidad de la curva dinámica será hacia arriba.
- En el ángulo de escora $\hat{\theta}_d$ para el máximo valor del GZ, la segunda derivada del brazo dinámico vale cero, originándose un punto de inflexión.

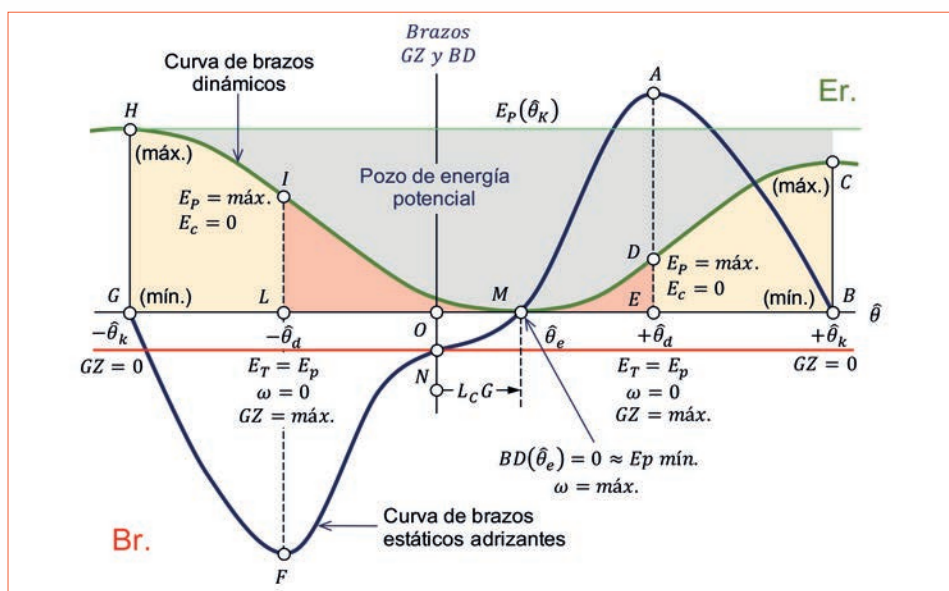


Fig. 17: Buque con escora permanente y altura metacéntrica positiva.

- Entre los ángulos de escora $\hat{\theta}_d$ y $\hat{\theta}_k$, los brazos estáticos y sus primeras derivadas son positivos, debido a ello, el brazo dinámico crece. Entre $-\hat{\theta}_d$ y $-\hat{\theta}_k$, los brazos dinámicos aumentan, pero con la concavidad hacia abajo.
- En el ángulo $\hat{\theta}_k$, el brazo estático vale cero y la primera derivada del brazo dinámico también, generándose en dicho punto un extremo (máximo o mínimo). Existe un máximo ya que a la izquierda de $\hat{\theta}_k$ el brazo estático es mayor que cero, entonces el brazo dinámico aumentará; por el contrario, a la derecha de $\hat{\theta}_k$ el brazo estático es menor que cero, entonces el brazo dinámico disminuirá.

- La otra rama de la curva del brazo dinámico será simétrica respecto al eje de ordenadas, debido a ello, para su representación se seguirá un razonamiento análogo.

En el caso que nos ocupa, el movimiento del buque se caracterizará como se indica:

- Si la energía total es menor que la energía potencial o dinámica, el movimiento sólo será posible en uno de esos dos intervalos; en concreto el que tome uno u otro dependerá del ángulo de escora $\hat{\theta}_t$ que tenía el buque cuando se inició el movimiento.

- En el caso de ser la energía total mayor que la energía potencial, el movimiento estará comprendido entre los ángulos de escora $-\hat{\theta}_d$ y $+\hat{\theta}_d$.

- 3) Buque escorado permanentemente con altura metacéntrica positiva (fig.17). En los casos anteriores, la curva dinámica era simétrica respecto al origen y al eje de ordenadas; es decir, siempre que el centro de gravedad del buque se encuentre sobre el plano diametral. En el caso que nos ocupa, desaparecen las circunstancias de simetría. Debido a ello, entre los ángulos límites de estabilidad o punto de fuga,

$+\hat{\theta}_k$ y $-\hat{\theta}_k$, se cumple que el brazo del par de adrizamiento se anula, existiendo un pozo de energía potencial de estabilidad abierto como se observa en la figura de referencia. Teóricamente lo indicado significa que, si soltáramos al buque en el punto de escora $-\hat{\theta}_k$, suponiendo que la resistencia del agua y del aire son nulas, el buque daría la voltereta, pero no sucedería lo mismo en el caso de soltarlo en el punto $+\hat{\theta}_k$.

Por último, el movimiento del buque se determinará de la siguiente manera:

- En este caso se cumple que: $E_c(\hat{\theta}) = E_T(\hat{\theta}) - E_P(\hat{\theta}) \geq 0$.
- El movimiento del buque queda restringido, en estas condiciones, al intervalo entre los ángulos de escora $-\hat{\theta}_d$ y $+\hat{\theta}_d$, ya que en dicho intervalo se cumple que: $E_T(\hat{\theta}) \geq E_P(\hat{\theta})$.
- El movimiento del buque no es posible a la izquierda de $-\hat{\theta}_d$ ni tampoco a la derecha de $+\hat{\theta}_d$.
- Supongamos que en $-\hat{\theta}_d$ empieza el movimiento, en dicho punto la velocidad angular vale cero por valer también cero la energía cinética (equilibrio dinámico), ya que existe un momento adrizante y, por lo tanto, el buque se pondrá en movimiento hacia la posición de equilibrio estático, alcanzando la energía cinética máxima ($\omega = \text{máx}$) al pasar por el punto $\hat{\theta}_e$.

EFFECTO DINÁMICO ORIGINADO POR UN MOMENTO ESCORANTE

Sea la curva de brazos o momentos estáticos adrizantes de un buque que se encuentra afectado por un brazo o momento transversal escorante. Lógicamente, el buque se encuentra sometido a la acción simul-

tánea de dichos momentos, que irán variando en función de la posición de escora adoptada, hasta alcanzar una posición de equilibrio estático determinada donde se cumple que: ambos momentos tengan la misma magnitud, es decir, sean iguales; esto sucede en los ángulos de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$ y crítico o límite $\hat{\theta}_{Cd}$.

El objetivo que perseguimos en este apartado es conocer la magnitud y el trabajo que ejerce el momento escorante cuando actúa sobre nuestro buque, es decir, el efecto dinámico de un par escorante.

Supongamos que aplicamos un momento escorante muy lentamente sobre el buque, de tal manera que se vaya escorando sin adquirir apenas velocidad angular, entonces se puede considerar como una inclinación de tipo estático. Sin embargo, si dicho momento escorante lo aplicamos rápidamente, el buque adquiere, para el mismo ángulo de escora, una velocidad angular de rotación que produce una energía cinética tal que, pueda incluso hacerlo zozobrar al alcanzar ángulos superiores al de equilibrio estático transversal. Al cesar el momento escorante, el buque contará con un exceso de

energía potencial de estabilidad que lo invertirá en volver a su posición inicial de equilibrio estático, dicho de otra forma, el exceso de energía potencial de estabilidad se transformará en energía cinética de movimiento, que cesará en el instante en que la energía sea absorbida por el rozamiento debido a la mar y al viento, es decir, hay que tener presente la magnitud y el trabajo realizado por el momento escorante¹².

Se debe tener presente que, cuando un buque se escora debido a una fuerza, se encuentra sometido a dos momentos: uno escorante M_e y otro adrizante M_a , los vectores que los representan actúan sobre un punto transversal, sus ejes de dirección son longitudinales, sentidos opuestos y sus magnitudes varían en función del ángulo de inclinación transversal o escora que adopte el buque.

Como hemos dicho, los sentidos de los vectores que representan a los momentos adrizante y escorante son contrarios, le daremos a la magnitud adrizante el signo positivo y magnitud escorante el signo negativo. El efecto neto será igual a la diferencia entre las magnitudes de dichos momentos.

$$M_T = M_e - M_a \rightarrow M_a = \Delta \cdot \overline{GZ} \rightarrow M_T = M_e - \Delta \cdot \overline{GZ} \quad [40]$$

Cuando un sólido gira alrededor de un eje fijo de dirección longitudinal, la constante de proporcionalidad, entre los momentos de las fuerzas aplicadas y las aceleraciones angulares producidas, es lo que se conoce como momento de inercia del sólido respecto del eje de giro. Si consideramos al sólido como discreto, su valor será

$$\sum_i m_i \cdot r_i^2 = I_0 \approx I_{xG} \quad [41]$$

Resulta que, $I_0 \approx I_{xG}$ dependiendo de como se encuentre concentrada la masa alrededor del eje de giro. Si I_{xG} es muy grande, esto quiere decir que la masa del cuerpo está alejada del eje de giro; por el contrario, si I_{xG} es pequeño, la masa se encuentra alrededor del eje de giro.

$$I_{xG} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_e - \Delta \cdot \overline{GZ} \quad [42]$$

De lo que se deduce que el movimiento de balance del buque en el plano transversal dependerá fundamentalmente de I_{xG} , o sea, de la distribución de la carga respecto del eje longitudinal que pasa por su centro de gravedad.

12.- La energía es en general la capacidad para realizar un trabajo; hay que distinguir dos tipos: a) Energía cinética o energía asociada con el movimiento. Es la que posee un cuerpo debido a su movimiento, es decir, el trabajo necesario para acelerar el cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada; b) Energía potencial o energía asociada con la posición. Es la asociada a la posición de un cuerpo dentro de un campo de fuerza, es decir, posición de un objeto con respecto a otro. Con independencia de la fuerza que la origine, la energía potencial que posee el sistema físico representa la energía almacenada en virtud de su posición y/o configuración, por contraposición con la energía cinética que representa su energía debido al movimiento.

Debido a ello y a la igualdad de momentos, la escora que alcanza el buque por la acción del momento escorante dependerá de la distribución de la carga con respecto al eje de giro. Si suponemos constante al momento neto, cuanto mayor sea r_i mayor será I_{xG} y entonces menor será $d\omega/dt$, por lo tanto, el movimiento de balance será más suave; recíprocamente, cuanto menor sea r_i menor será I_{xG} y mayor será $d\omega/dt$, el movimiento de balance es más rápido. Dicho esto, multipliquemos por $d\theta$ ambos miembros de la ecuación (42)

$$I_{xG} \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot d\theta = M_e \cdot d\theta - \Delta \cdot \overline{GZ} \cdot d\theta$$

Despejando el momento escorante,

$$M_e \cdot d\theta = \Delta \cdot \overline{GZ} \cdot d\theta + I_{xG} \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot d\theta \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega \rightarrow M_e \cdot d\theta = \Delta \cdot \overline{GZ} \cdot d\theta + I_{xG} \cdot \omega \cdot d\omega$$

Cuando integramos en función de dos escoras cualesquiera, una inicial $\hat{\theta}_0$ y otra final $\hat{\theta}_1$, en el segundo sumando de la igualdad, la variable de integración es ω (valor que toma para cada inclinación); entonces, si $\hat{\theta}_0 \leq \hat{\theta} \leq \hat{\theta}_1$ resultará que: $\omega(\hat{\theta}_0) \leq \omega \leq \omega(\hat{\theta}_1)$

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta = \Delta \cdot \int_{\theta_0}^{\theta_1} \overline{GZ} \cdot d\theta + I_{xG} \cdot \int_{\omega(\theta_0)}^{\omega(\theta_1)} \omega \cdot d\omega \quad [43]$$

Para desarrollar la ecuación (43) debemos considerar la siguiente idea:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx = - \int_c^a f(x)dx + \int_b^c f(x)dx$$

Apliquémosla al primer sumando de la ecuación (43),

$$\begin{aligned} \int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta &= \Delta \cdot \left[\int_{\theta_0}^{\theta_2} \overline{GZ} \cdot d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_1} \overline{GZ} \cdot d\theta \right] + I_{xG} \cdot \int_{\omega(\theta_0)}^{\omega(\theta_1)} \omega \cdot d\omega \\ \int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta &= \Delta \cdot \left[- \int_{\theta_2}^{\theta_0} \overline{GZ} \cdot d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \overline{GZ} \cdot d\theta \right] + I_{xG} \cdot \int_{\omega(\theta_0)}^{\omega(\theta_1)} \omega \cdot d\omega \\ \int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta &= -\Delta \cdot \int_{\theta_2}^{\theta_0} \overline{GZ} \cdot d\theta + \Delta \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \overline{GZ} \cdot d\theta + I_{xG} \cdot \int_{\omega(\theta_0)}^{\omega(\theta_1)} \omega \cdot d\omega \\ \int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta &= [E_P(\hat{\theta}_1) - E_P(\hat{\theta}_0)] + \left[I_{xG} \cdot \frac{1}{2} \omega^2 \right]_{\omega(\theta)}^{\omega(\theta_1)} \\ \int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta &= [E_P(\hat{\theta}_1) - E_P(\hat{\theta}_0)] + \left[\frac{1}{2} I_{xG} \cdot \omega^2(\hat{\theta}_1) - \frac{1}{2} I_{xG} \cdot \omega^2(\hat{\theta}_0) \right] \\ \int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta &= [E_P(\hat{\theta}_1) - E_P(\hat{\theta}_0)] + [E_C(\hat{\theta}_1) - E_C(\hat{\theta}_0)] = \left[\frac{E_P(\hat{\theta}_1) + E_C(\hat{\theta}_1)}{E_T(\hat{\theta}_1)} \right] - \left[\frac{E_P(\hat{\theta}_0) + E_C(\hat{\theta}_0)}{E_T(\hat{\theta}_0)} \right] \\ \boxed{\int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta} &= \boxed{E_T(\hat{\theta}_1) - E_T(\hat{\theta}_0)} \quad [44] \end{aligned}$$

Fundamentalmente, la integral representa el trabajo elemental realizado por el momento escorante, entre $\hat{\theta}_0$ y $\hat{\theta}_1$, donde $E_T(\hat{\theta}_1) - E_T(\hat{\theta}_0)$ representa la variación de la energía mecánica del buque entre dichos ángulos de escora. La expresión (44) nos pone de manifiesto el principio de conservación de la energía.



Fuente: Francois Souchet - www.pinterest.es

Para concluir, supongamos que el momento escorante vale cero, o sea, $0 = E_T(\hat{\theta}_1) - E_T(\hat{\theta}_0)$. Este caso responde al movimiento, en el plano transversal, de un buque de superficie que ha sido separado inicialmente de su posición de equilibrio estable mediante un momento escorante cualquiera que más tarde desaparecerá. Por tal motivo, la energía potencial almacenada del buque debido al momento escorante, se transformará en energía cinética de movimiento, quedando el buque en movimiento bajo la única acción del par de estabilidad transversal, por suponer que no existen resistencias externas.

Aplicando a la hipótesis indicada en la ecuación (44),

$$0 = E_T(\hat{\theta}_1) - E_T(\hat{\theta}_0) \rightarrow E_T(\hat{\theta}_1) = E_T(\hat{\theta}_0) = Cte.$$

También conocemos que: $E_T(\hat{\theta}_1) = E_P(\hat{\theta}_1) + E_C(\hat{\theta}_1)$, ahora despejando $E_C(\hat{\theta}_1)$

$$E_C(\hat{\theta}_1) = E_T(\hat{\theta}_1) - E_P(\hat{\theta}_1) \quad [45]$$

Por definición, $I_{xG} = \sum m_i \cdot r_i^2 > 0$, y como, $\omega^2(\hat{\theta}_1) > 0$, implica que, $E_C(\hat{\theta}_1) > 0$. Es decir, en el segundo miembro de la expresión (45) tenemos que $E_P(\hat{\theta}_1)$ no puede ser mayor que el primero $E_T(\hat{\theta}_1)$. En otras palabras, en estas condiciones, el movimiento del buque en el plano transversal únicamente será posible cuando se cumpla que: $E_T(\hat{\theta}_1) > E_P(\hat{\theta}_1)$.



Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/34579207764884>

RESERVA DE ESTABILIDAD DINÁMICA

Cuando un momento escorante afecte a un buque de superficie, simultáneamente se reduce la estabilidad estática transversal del mismo. Las curvas de los momentos escorantes y adrizantes se representan sobre los ejes de coordenadas, en el eje de abscisas tenemos los ángulos de escoras y sobre el eje de ordenadas, los valores de los brazos o momentos.

Para el ángulo de escora permanente, de equilibrio estático o primer ángulo de equilibrio $\hat{\theta}_{Ep}$, tendremos una altura metacéntrica positiva, cuyo valor queda limitado por las rectas tangentes a las curvas de los momentos o brazos adrizante y escorante justo sobre la vertical en el ángulo de escora $\hat{\theta}_{Ep} + 1 \text{ radianes}$. De igual forma, definimos el ángulo crítico o límite de estabilidad $\hat{\theta}_{Cd}$ (segundo ángulo de equilibrio, en este caso no estable), obteniéndose una altura metacéntrica generalizada negativa.

La reserva de estabilidad para un

ángulo de escora cualquiera: es la diferencia entre los brazos o momentos adrizantes y escorantes; es decir, la energía estable que tiene acumulada un buque de superficie que le permite afrontar acciones que tiendan a apartarlo de su posición de equilibrio. Lo indicado, tiene una influencia directa en la seguridad de los buques, su variabilidad debe examinarse cuidadosamente con especial énfasis en el riesgo de dar la voltereta¹³.

$$R_E = M_a - M_e \quad [46]$$

Para una escora cualquiera, la reserva de estabilidad podrá ser:

$$\begin{aligned} M_a > M_e &\rightarrow R_E > 0 (+) \\ M_a < M_e &\rightarrow R_E < 0 (-) \\ M_a = M_e &\rightarrow R_E = 0 \end{aligned}$$

Según lo indicado, la reserva de estabilidad es positiva cuando el brazo o momento adrizante sea mayor que el escorante, y es nega-

tiva cuando, el brazo o momento adrizante sea menor que el escorante; para aquellos ángulos de escora donde las curvas estáticas adrizante y escorante se corten, como resulta que los brazos o momentos adrizante y escorante son iguales, la reserva de estabilidad será nula. Importante: cuanto mayor sea el brazo escorante menor será la reserva de estabilidad (área comprendida entre curvas de brazos adrizantes y escorantes).

Ahora, vamos a estudiar las posiciones relativas que las curvas estáticas adrizante y escorante adoptan entre sí (fig.18):

- 1) Las curvas de brazos o momentos adrizantes y escorantes se cortan en dos puntos: El primer punto de corte A define el ángulo de escora permanente o de equilibrio estático, $\hat{\theta}_{Ep}$. La reserva de estabilidad antes de llegar a $\hat{\theta}_{Ep}$, es negativa, siendo la tendencia del buque la de aumentar el ángulo

13.- Esta definición no tiene en cuenta las fuerzas de inercia, hidrodinámica y fricción. Los cálculos se basan en condiciones cuasi estáticas. Los errores inherentes a esta suposición aún no han sido plenamente identificados.

de escora hasta alcanzar la posición de equilibrio; superado $\hat{\theta}_{Ep}$, la reserva de estabilidad es positiva, siendo mayor el momento adrizante que el escorante, el buque recuperará la posición del ángulo de equilibrio estático.

El segundo punto de corte C nos informa del ángulo, a partir del cual, la reserva de estabilidad se convierte en negativa, siendo la tendencia del buque la de aumentar su escora hasta dar la voltereta; este ángulo de escora se conoce como, ángulo crítico o límite de estabilidad $\hat{\theta}_{Cd}$. En el punto C , el equilibrio será inestable, ya que antes de llegar a dicho punto, el momento residual (igual a la reserva de estabilidad) será adrizante, separándose del ángulo de equilibrio; pasado el punto C , el momento residual será escorante por lo que la escora aumenta generándose la pérdida del buque.

- 2) Las curvas de brazos o momentos adrizantes y escorantes tienen en común un punto de tangencia: En este caso, el ángulo correspondiente al punto de tangencia se denomina ángulo crítico de estabilidad estática siendo aquí, el equilibrio del buque inestable.
- 3) Ángulo de escora donde se cumple que el momento escorante es mayor que el adrizante: Aquí, no existe posibilidad de equilibrio por no cumplirse la condición de igualdad entre los dos momentos perdiéndose el buque.
- 4) Las curvas de brazos o momentos adrizante y escorante solo se cortan en un punto. Situación anormal, en este caso sólo se produce el primer punto de corte A entre ambas curvas, no existe el segundo C . El ángulo donde la curva de momentos adrizantes corta al eje de abscisas es mayor que el ángulo de corte de la curva de momentos escorantes con dicho eje. Es decir, a partir del ángulo de equilibrio estable, el momento

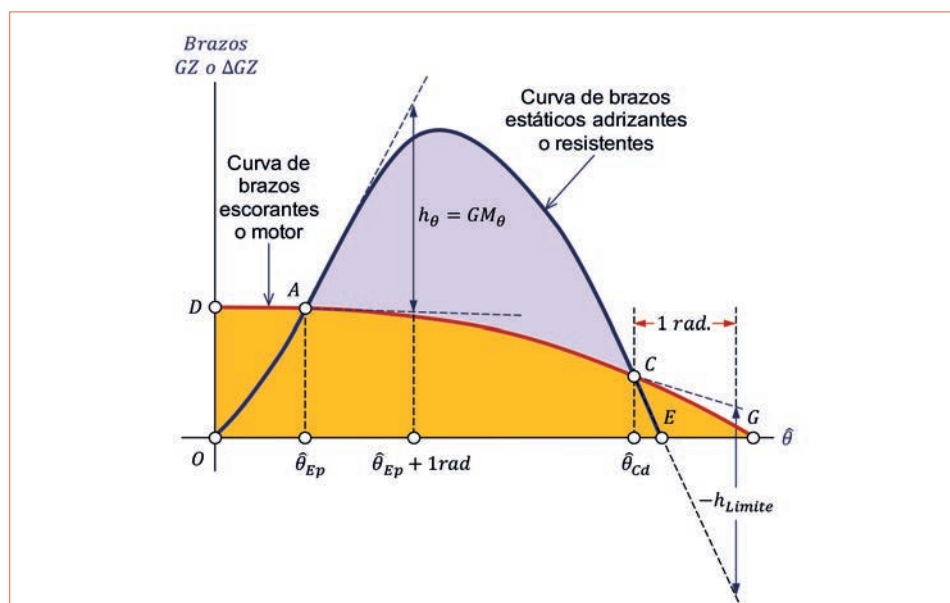


Fig. 18: Momentos escorante y adrizante con dos puntos de corte.

adrizante será mayor que el escorante, para cualquier ángulo de balance que tome el buque.

Del análisis de los casos de equilibrio anteriores, $M_e = M_a$, se llega a la siguiente conclusión: el buque tendrá equilibrio estable en estos puntos cuando la pendiente de la tangente a la curva de momentos adrizantes sea mayor que la correspondiente a la curva de momentos escorantes, es decir, se cumpla que:

$$\frac{dM_a}{d\theta} > \frac{dM_e}{d\theta}$$

En el caso de no ser estable la condición de equilibrio, la pendiente de la tangente a la curva de momentos adrizantes será menor que la pendiente de la tangente a la curva de momentos escorantes, entonces,

$$\frac{dM_a}{d\theta} < \frac{dM_e}{d\theta}$$

Cuando los valores de las dos pendientes sean iguales, hay que estudiar el entorno próximo a este ángulo de equilibrio para poder determinar si es estable o inestable,

$$\frac{dM_a}{d\theta} = \frac{dM_e}{d\theta}$$

En la práctica, lo más probable es que corresponda a una situación de equilibrio inestable¹⁴.

ESTUDIO DE LOS INTERCAMBIOS DE ENERGÍA QUE SE PRODUCEN SOBRE UN BUQUE DESDE QUE SE LE APLICA UN MOMENTO O PAR PERTURBADOR HASTA QUE ENCUENTRA SU POSICIÓN DE EQUILIBRIO FINAL

Para verificar una condición de equilibrio, debe existir igualdad entre los trabajos realizados por el momento del par escorante o motor y el momento del par adrizante o resistente. Considerando lo indicado, estudiemos el movimiento de balance del buque debido a la acción conjunta de un momento escorante y otro adrizante.

Inicialmente el buque se encuentra en equilibrio estático siendo el momento del par adrizante igual a cero ($M_a = \Delta \cdot GZ = 0$) (fig.19). Si aplicamos un par escorante (M_e) producido por un viento de través, un instante después de su aplicación, el buque dejará de estar en equilibrio estático, debido a que sobre él actúa la presión o fuerza del viento, que se traduce en una fuerza $+F_w$ cuya acción suponemos concentrada en el centro vélico de la superficie del buque expuesta al viento (punto M_v , centro de gravedad de la superficie expuesta).

14.- Este punto se le denomina ángulo crítico de estabilidad estática y el equilibrio del buque es inestable. Cuando el momento del par escorante alcance un valor tal que las curvas únicamente sean tangentes en un punto, siendo la reserva de estabilidad negativa antes y después de este punto de tangencia, al ángulo de equilibrio correspondiente a ese punto se le denomina ángulo crítico estático.

La fuerza $+F_w$ tratará de empujar al buque transversalmente, generando otra fuerza $-F_M$ igual y contraria, aplicada en el baricentro de la superficie sumergida llamado centro de deriva; es decir, la resistencia del agua sobre la obra viva o carena se ejerce en el punto de resistencia lateral R_L , situado aproximadamente en la mitad del calado del buque.

El momento del par escorante o motor que trata de escorar al buque hacia sotavento, está formado por la fuerza (presión por unidad de superficie), y por el brazo (distancia h entre el centro vélico y el centro de deriva). Inicialmente el momento escorante o motor es el que inclina transversalmente al buque, el momento adrizante aparecerá un poco más tarde, actuando como un momento resistente.

Cuando el buque, por causas del momento escorante o motor, se haya inclinado un ángulo $\hat{\theta}$, la fuerza $+F_w$ se habrá reducido por quedar, la superficie ofrecida al viento, multiplicada por el $\cos \hat{\theta}$. Al escorarse el buque, el área expuesta se reduce en función del coseno del ángulo de escora, sucediendo lo mismo con el brazo, es decir, la fuerza que actúa sobre el buque es ahora $F_w \cdot \cos \hat{\theta}$, y como el brazo

$$M_{par} = P_v \cdot A_v \cdot \cos \hat{\theta} \cdot h \cdot \cos \hat{\theta} = P_v \cdot A_v \cdot h \cdot \cos^2 \hat{\theta} \quad [47]$$

La presión por unidad de superficie P_v , no es fácil de calcular por diversas circunstancias; un valor muy utilizado, en función de la velocidad del viento, es $P_v = 0,0195 \cdot V^2$, donde la velocidad se expresa en nudos y la presión en Kgs/m^2 . La nueva expresión del momento escorante debido a la acción del viento será la siguiente:

$$M_{par} = 0,0195 \cdot V^2 \cdot A_v \cdot h \cdot \cos^2 \hat{\theta} \quad [48]$$

y el brazo escorante debido al viento en metros,

$$B_e = \frac{0,0195 \cdot V^2 \cdot A_v \cdot h \cdot \cos^2 \hat{\theta}}{1000 \cdot \Delta} \quad [49]$$

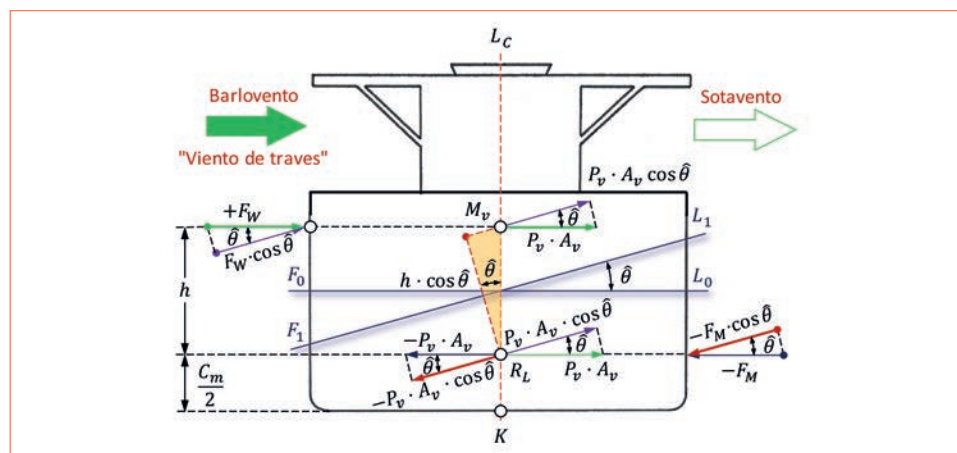


Fig. 19: Efecto dinámico de un par escorante.

h , también se habrá reducido, su valor será $h \cdot \cos \hat{\theta}$.

La resistencia de la mar se ejerce en el punto de resistencia lateral R_L , aproximadamente situado en la mitad del calado; en dicho punto se forma un par escorante, debido a la acción de la fuerza exterior, que obliga al buque a escorarse a la banda opuesta o sotavento hasta alcanzar la flotación $F_1 L_1$. El par producido está formado por la fuerza $+F_w$ (presión por unidad de superficie), y el brazo (distancia vertical entre el centro de gravedad del área expuesta al viento M_v y el centro de resistencia lateral R_L). Debido a este par, el buque se escora, siendo el momento del par escorante el siguiente,

Estudiemos ahora, los intercambios de energía que se producen sobre un buque desde que se le aplica un momento o par motor, perturbador o escorante M_e , hasta que el buque encuentra su posición de equilibrio final. Lógicamente, para que el equilibrio se verifique debe existir igualdad entre los trabajos realizados por el par motor o escorante y el par resistente o adrizante¹⁵.

Supongamos que los pares se aplican mediante una ley en función del ángulo de escora, pero sin tener en cuenta el efecto del amortiguamiento viscoso que actúa sobre el buque¹⁶. Esto equivale a admitir que los intercambios de energía mecánica entre el buque y el medio exterior son totalmente reversibles. Para hacer coincidir el periodo del movimiento armónico del buque con el real, debemos considerar que la masa del buque aumenta debido a una cierta masa del líquido que le rodea que supuestamente se mueve adherida al casco. La energía cinética que esta masa absorbe equivale al trabajo pasivo captado por las fuerzas de amortiguamiento viscoso¹⁷.

Como hemos considerado, inicialmente el buque se encuentra en equilibrio estático, de repente, actúa sobre él un par perturbador o

15.- El empuje y el desplazamiento son fuerzas que utilizaremos para entender el concepto de momento adrizante. Si mediante una fuerza externa, el buque abandona su condición inicial de equilibrio quedando escorado con un determinado ángulo, resulta que: el desplazamiento permanece invariable con su peso aplicado en el centro de gravedad; el empuje también se mantiene constante, pero no así su punto de aplicación que cambia al nuevo centro de carena, de esta manera se crea una recta de acción GZ o brazo adrizante. Debido a lo indicado, se establece una nueva distribución de las fuerzas en el buque, generándose un par de fuerzas denominado momento adrizante, que origina que el buque retorne a su posición de equilibrio inicial.

16.- El coeficiente de amortiguamiento viscoso es un parámetro teórico capaz de explicar la disipación de energía debida a las fricciones que frenan el movimiento. No es un parámetro físico real como la masa y la constante elástica a los cuales se puede acceder con una medición simple.

17.- El amortiguamiento se define como la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Típicamente los amortiguadores disipan la energía cinética en energía térmica y/o en energía plástica, es decir, la función de un amortiguador es recibir, absorber y mitigar una fuerza tal, ya sea porque se ha dispersado o porque la energía se ha transformado de forma que la fuerza inicial se haya hecho menor. Cuanto mejor sea la amortiguación de la fuerza inicial, menor será la fuerza recibida sobre el punto final.



Fuente: Maxresdedault.jpg – Marine Sight.

escorante generado por un viento de través cuya fuerza F_w , se supone concentrada en el punto M_v , produciendo un trabajo al escorarse el buque hacia sotavento. A este trabajo le llamamos trabajo motor o escorante, y como respuesta a él, tenemos una fuerza que tiende a evitar que el buque siga escorando, generando un trabajo resistente o adrizante equivalente a la estabilidad dinámica del buque, este trabajo tiene por valor el área bajo la curva de brazos adrizantes GZ ; dicha área multiplicada por el desplazamiento nos facilita el trabajo resistente o adrizante que será el del par $\Delta \cdot GZ$.

Analizaremos paso a paso lo que sucede (fig.20):

1. Punto origen. Inicialmente nuestro buque se encuentra en equilibrio estático, $E_c(\hat{\theta}_0) = E_p(\hat{\theta}_0) = 0 \Rightarrow E_T(\hat{\theta}_0) = 0$, siendo cero el momento adrizante. Inicialmente es el momento escorante quien mueve al buque, y curiosamente el momento adrizante como resistente no aparecerá hasta más tarde. En la figura de referencia, hemos representado en color azul la curva del brazo adrizante o resistente, y en rojo la curva del brazo escorante o motor debido a una racha de viento transversal intenso que, en dicho punto, alcanza su valor máximo. Si ahora, en la ecuación (44) consideramos por hipótesis que $E_T(\hat{\theta}_0) = 0$, sustituyendo y despejando, resultará:

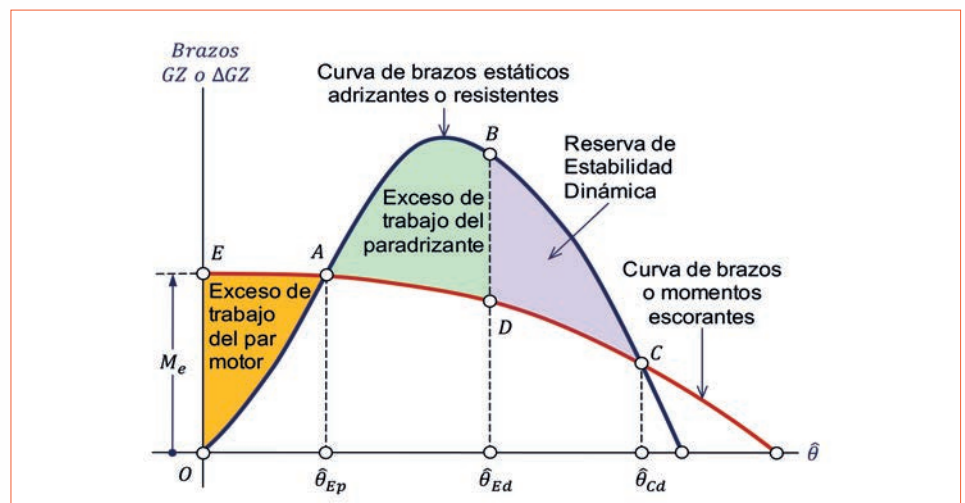


Fig. 20: Par motor o escorante y par resistente o adrizante.

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} M_e \cdot d\theta = E_T(\hat{\theta}_1) - \underbrace{E_T(\hat{\theta}_0)}_0 = E_T(\hat{\theta}_1) - 0 \rightarrow E_T(\hat{\theta}_1) = E_p(\hat{\theta}_1) + E_c(\hat{\theta}_1)$$

Sustituyendo y reorganizando,

$$E_c(\hat{\theta}_1) = \int_{\theta_0}^{\theta} M_e \cdot d\theta - E_p(\hat{\theta}_1) \rightarrow E_c(\hat{\theta}_1) = \underbrace{\int_{\theta_0}^{\theta} M_e \cdot d\theta}_{(a)} - \underbrace{\int_{\theta_0}^{\theta} \Delta \cdot \overline{GZ} \cdot d\theta}_{(b)} \geq 0$$

Donde, la primera integral (a) representa el área encerrada por la curva de momentos escorantes, y la segunda integral (b) el área bajo la curva de brazos adrizantes.

2. Entre los puntos origen y ángulo de escora permanente. A partir del origen, el buque comienza a escorarse de forma progresiva hacia sotavento, convirtiendo simultáneamente su energía potencial en energía cinética debido a que hasta el punto A, el par perturbador o escorante es mayor que el par adrizante o resistente, resul-

tando que, el trabajo desarrollado por el primero es superior a la energía absorbida por segundo, siendo la diferencia de los trabajos realizados por ambos a favor del par perturbador o escorante. Es decir, en cada instante del recorrido el buque adquiere progresivamente una energía cinética igual al exceso de trabajo del par

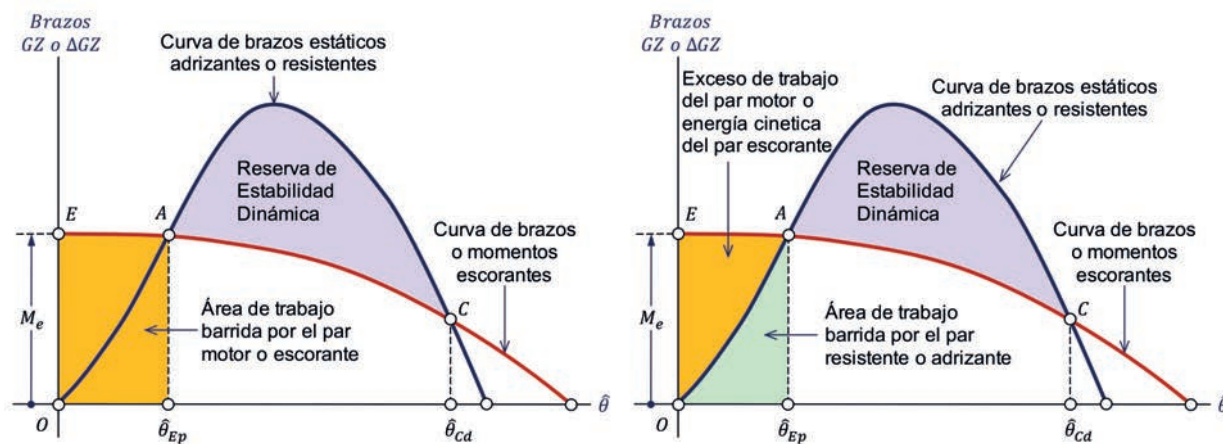


Fig. 21: Ángulo de equilibrio estático o de escora permanente.

escorante sobre el par adrizante o resistente, alcanzando el ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$, con una velocidad escorante distinta de cero, por lo que no se detiene en dicho punto.

3. Punto A o de escora permanente.

Al alcanzar el ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$, son iguales los pares escorante y adrizante, pero el movimiento de escora continúa debido a que el escorante $A\hat{\theta}_{Ep}OE$ ha realizado más trabajo que la energía absorbida por el adrizante $OA\hat{\theta}_{Ep}$; o sea, la diferencia de trabajos realizados por ambos pares está a favor del par motor o escorante, este exceso de energía produce una velocidad escorante que es la responsable de que no se detenga el buque en el punto A.

El buque será capaz de oscilar entorno al ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$ debido a la acción de un fenómeno exterior, ya que, para cada ángulo de escora diferente, se genera sobre él un par de fuerzas, que será adrizante, si $\hat{\theta} > \hat{\theta}_{Ep}$ y escorante si $\hat{\theta} < \hat{\theta}_{Ep}$, que tiende a llevarlo a la posición de equilibrio estático $\hat{\theta} = \hat{\theta}_{Ep}$, donde el empuje y el desplazamiento vuelven a estar sobre el mismo vertical.

Como se ha indicado, el buque alcanzará el ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$, con una determinada velocidad angular ω debida a la energía cinética que posee en dicho instante. Calculemos ahora, el valor del exceso de área o energía cinética que tendrá nuestro buque,

$$d \frac{1}{2} I_x \cdot \omega^2 = (M_e - M_a) d\theta \quad \begin{cases} M_a = \Delta \cdot GZ \\ M_e = p \cdot dt \cdot \cos \hat{\theta} \end{cases}$$

$$d \frac{1}{2} I_x \cdot \omega^2 = (p \cdot dt \cdot \cos \hat{\theta} - \Delta \cdot GZ) d\theta$$

Integrando ambos miembros,

$$\int d \frac{1}{2} I_x \omega^2 = \int_0^{\hat{\theta}} p dt \cos \hat{\theta} d\theta - \int_0^{\hat{\theta}} \Delta GZ d\theta$$

$$\boxed{\frac{1}{2} I_x \omega^2 = \int_0^{\hat{\theta}} p dt \cos \hat{\theta} d\theta - \Delta GZ \int_0^{\hat{\theta}} d\theta}$$

[50]

Esta ecuación representa el valor de la energía cinética acumulada por el buque en el ángulo de escora permanente que le obliga a no detenerse y seguir escorando hasta alcanzar el ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$; es decir, la energía cinética acumulada en el exceso de área OAE que obliga al buque a continuar girando. Si la escora se produce dentro de la estabilidad inicial, $(\Delta \cdot GZ)$ se sustituye por $(\Delta \cdot GM \cdot \sin \hat{\theta})$.



Fuente: Rempiotrowski / Adobe Stock.

- Entre los puntos de escora permanente y equilibrio dinámico. Como hemos dicho, a partir del punto A o de escora permanente, el buque continuará girando con la característica de comenzar a ser progresivamente el par adrizante o resistente mayor que el par escorante o mo-

tor, simultáneamente se origina una disminución, también progresiva, de su velocidad y de su energía cinética hasta agotarse, por haberse utilizado en vencer el exceso del par adrizante o resistente sobre el par escorante o motor en el intervalo limitado por $\hat{\theta}_{Ep}$ y $\hat{\theta}_{Ed}$ (lo indicado sucede

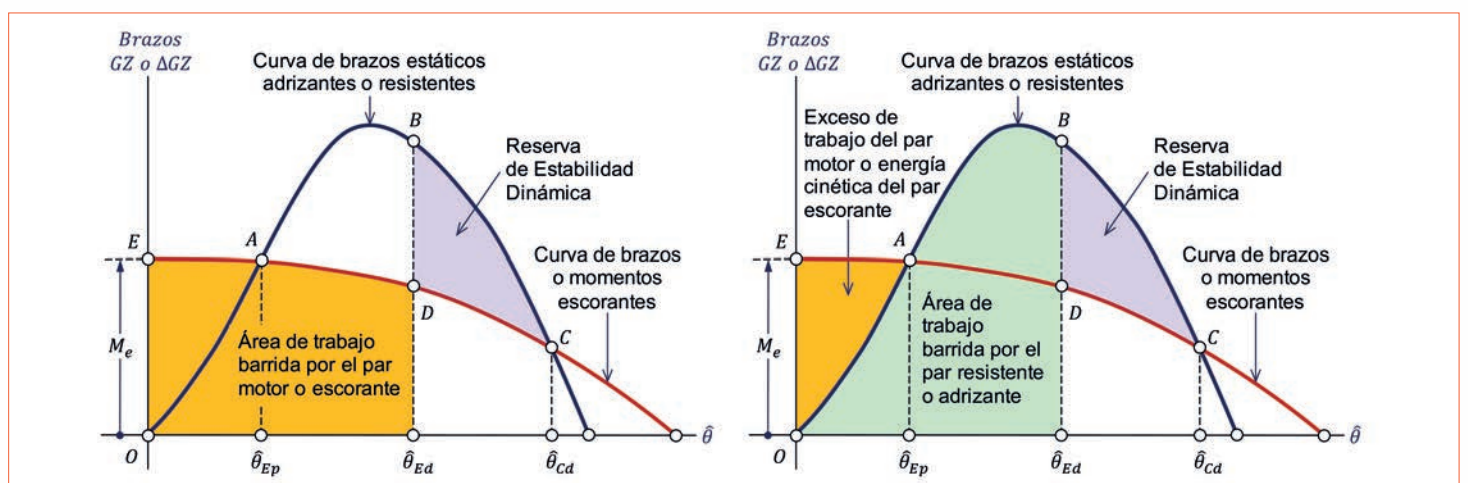


Fig. 22: Punto de equilibrio dinámico.

al alcanzar el ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$.

5. Punto B o de equilibrio dinámico (fig.22). El buque llega al ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$, donde se cumple que el trabajo realizado o energía cinética gastada por el par escorante o motor hasta dicho punto, se habrá consumido en intentar vencer al par adrizante o resistente, alcanzando el ángulo de equilibrio dinámico con energía cinética y velocidad escorante nula, $E_C(\hat{\theta}_{Ed}) = 0$. En dicho punto, se cumple que las áreas OEA y ABD son iguales, debido a ello, el buque quedará momentáneamente parado unos segundos por ser el par adrizante o resistente mayor que el par escorante o motor, seguidamente, actuará el primero como par escorante o motor y el segundo como adrizante o resistente, iniciándose de nuevo el movimiento, pero en sentido contrario, hacia barlovento. El buque comienza a recuperarse, disminuyendo de manera progresiva el ángulo de escora, pasando nuevamente por $\hat{\theta}_{Ep}$ con una determinada energía cinética medida por el área ABD y así sucesivamente hasta pararse definitivamente en el punto A. Para que lo indicado ocurra así, la escora correspondiente al ángulo de equilibrio dinámico debe contar con una reserva de estabilidad positiva¹⁸.

En el caso de ser el área OEA mayor que el área ABD , el trabajo escorante o motor será mayor que el trabajo adrizante o resistente, debido a ello, el buque continuará escorándose. En el caso de coincidir el ángulo de equilibrio dinámico con el ángulo crítico estático ($\hat{\theta}_{Ed} = \hat{\theta}_{Cd}$), el buque llegará a dicho punto con energía cinética nula, y al ser iguales los pares adrizante y escorante, teóricamente permanecerá allí.

Como se ha indicado, en el punto donde se genera el ángulo de equilibrio dinámico, la energía cinética es igual a cero $E_C(\hat{\theta}_{Ed}) = 0$, veamos esto:

$$\int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} M_e \cdot d\hat{\theta} = E_C(\hat{\theta}_{Ed}) + E_P(\hat{\theta}_{Ed}) \rightarrow E_C(\hat{\theta}_{Ed}) = \int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} [M_e \cdot d\hat{\theta} - E_P(\hat{\theta}_{Ed})]$$

$$\frac{E_C(\hat{\theta}_{Ed})}{0} = \int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} M_e \cdot d\hat{\theta} - \int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} \Delta \cdot GZ \cdot d\hat{\theta} \rightarrow 0 = \int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} M_e \cdot d\hat{\theta} - \int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} \Delta \cdot GZ \cdot d\hat{\theta}$$

$$\boxed{\int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} \Delta \cdot GZ \cdot d\hat{\theta} = \int_0^{\hat{\theta}_{Ed}} M_e \cdot d\hat{\theta}} \quad [51]$$

La expresión obtenida representa la igualdad de áreas bajo las curvas de los pares escorante y adrizante.

6. Finalización del movimiento transversal del buque. El movimiento completo que acabamos de describir se repetirá exactamente igual, si no fuera por la resistencia de los medios que originan que, en cada ciclo de balance cierta cantidad de la energía disponible se invierta de forma progresiva en vencer a las fuerzas de rozamiento de modo que, las oscilaciones sean cada vez de menor amplitud quedando finalmente el buque parado y en equilibrio con un ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$. En la realidad, y para cada ciclo de balance, se pierde cierta cantidad

de energía debido precisamente a las fuerzas de amortiguamiento que obligan al buque a converger al ángulo de equilibrio estático o de escora permanente que coincide con una posición de equilibrio estable. Si no existe rozamiento de la obra viva con el agua y de la obra muerta con el aire, el buque oscilará permanentemente alrededor de $\hat{\theta}_{Ep}$.

Cuando el trabajo realizado por el momento escorante sea igual al trabajo efectuado por el momento adrizante, cumpliéndose que, $E_C(\hat{\theta}) = 0$, y $\omega = 0$, el buque quedará en equilibrio dinámico.

18.- En este sentido destacamos que, en el punto donde se produce el ángulo de escora $\hat{\theta}_{Ed}$, las áreas escorante y adrizante se igualan, la energía cinética se agota y el buque permanecerá en equilibrio dinámico. Aquí, el trabajo realizado por el par adrizante será mayor que el del par escorante, por lo tanto, actuará un momento neto adrizante que tiende a mover el buque hacia su posición de equilibrio (punto A).

Conclusiones.

- Tras realizar una serie de oscilaciones alrededor del ángulo de equilibrio estático, el buque se detiene quedando en equilibrio con un ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$; para que esto se cumpla, a partir del ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$ debe existir un área de reserva de estabilidad positiva.
- El área BDC , entre las curvas de brazos adrizante o resistente y escorante o motor, representa la reserva de estabilidad dinámica o energía potencial adrizante remanente.
- Cuando un buque con escora permanente, se encuentre afectado por la acción de una segunda fuerza exterior, de tal manera que su ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$ supera su ángulo crítico de equilibrio dinámico o límite de estabilidad $\hat{\theta}_{Cd}$, no contará con la posibilidad de poder volver a su posición inicial, por no ser capaz de absorber toda la energía suministrada por el momento escorante, escorándose aún más debido a que el par adrizante se convierte en par escorante obligando al buque a dar la voltereta.
- El equilibrio dinámico es instantáneo y no permanente. En efecto, una vez alcanzado el ángulo $\hat{\theta}_{Ep}$, el buque, si el viento continúa soplando con la misma intensidad, volverá a adrizarse, y como parte de la energía se va disipando por fricción, etc., después de varias oscilaciones quedará en la posición de equilibrio estático $\hat{\theta}_{Ep}$, navegando con esta escora permanente mientras no varíe la intensidad del viento.
- La energía cinética es la energía asociada con el movimiento, y la energía potencial es la asociada a la posición relativa dentro de un sistema, es decir, la posición de un objeto con respecto a otro.

- El concepto de energía es en general, la capacidad para realizar un trabajo.

EFFECTO DE LA ACCIÓN PRODUCIDA POR AGENTES EXTERNOS ESCORANTES SOBRE UN BUQUE DE SUPERFICIE

Las fuerzas escorantes se estiman mediante cálculo y su acción se expresa en momentos escorantes que se trazan en función de los ángulos de inclinación de la curva de brazos o momentos adrizantes, considerando el desplazamiento constante en cada condición que se analice. Estudiemos los casos más importantes que nos encontraremos debido a la acción de diferentes agentes externos sobre un buque:

1. Buque afectado únicamente de balance. El oleaje es la más importante de las acciones que puede poner en peligro a un buque. Las olas cuentan con un comportamiento estocástico y su acción puede separarse en dos componentes: a) la que caracteriza a las olas en un mar regular con una altura, frecuencia y dirección de propagación constan-

tes, y b) una componente caracterizada por un mar aleatorio.

En el caso que nos ocupa, (fig.23), suponemos que el buque sufre una oscilación por la acción de las olas, pero en este caso, sin que actúe un momento escorante propiamente dicho, hasta el ángulo de escora $-\hat{\theta}_m$.

Suponiendo que el buque se encuentra inicialmente adrizado (sin escora), que la curva de brazos adrizantes GZ tiene simetría impar y las simplificaciones habituales de despreciar las diversas resistencias, se cumple lo siguiente: ($a = b$) y ($+\hat{\theta}_m = -\hat{\theta}_m$),

2. Buque afectado por viento de través con balance. La acción del viento sobre la obra muerta produce un abatimiento hacia sotavento debido a la presión que ejerce sobre el buque por unidad de superficie. Este movimiento en sentido lateral, además de abatimiento produce escora que será función del ángulo que la dirección del viento forma con el plano diametral del buque y de la presión que este viento haga por unidad de superficie¹⁹.

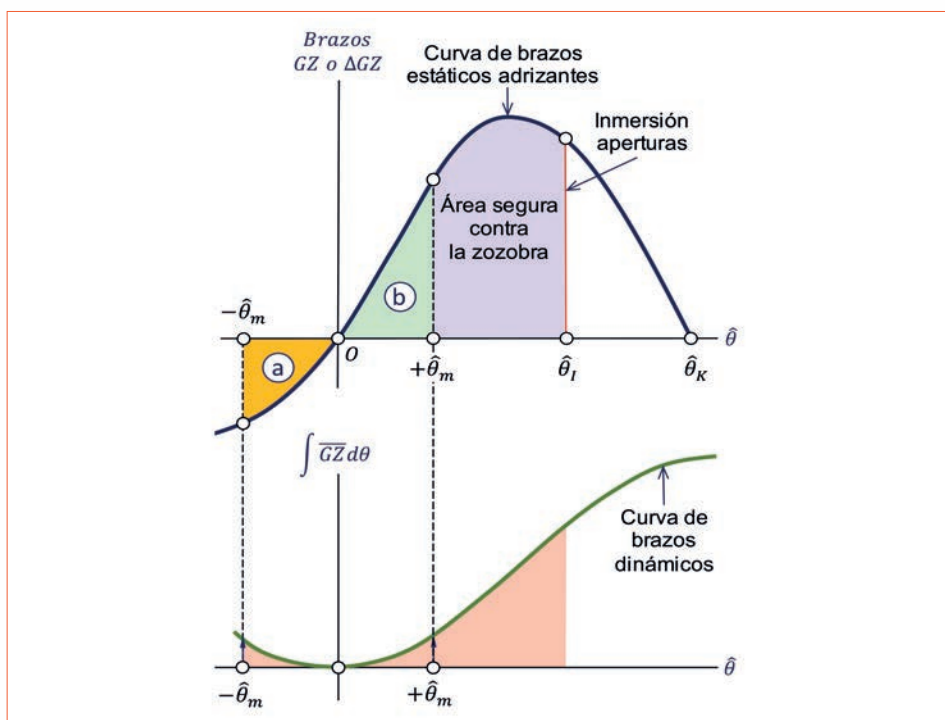


Fig. 23.

19.- En el estudio de la acción del viento sobre el buque, supondremos siempre las peores circunstancias que se nos pueden presentar en servicio, o sea, viento de través, que es donde encuentra mayor superficie para hacer presión.

El viento de través y el balance se consideran simultáneamente, ya que es de esperar que exista una mar relativamente gruesa, cuando los vientos son duros. Al tener presente la acción de las olas, es necesario aumentar en un porcentaje adecuado la estabilidad dinámica, para absorber la energía comunicada al buque por el movimiento de balance.

El viento, cuando encuentra un obstáculo en su camino, ejercer una presión sobre él en función de la velocidad con la que esté soplando: $P = f(v)$. Existen diversas expresiones empíricas de la función anterior; algunas de ellas consideran que la presión es uniforme, mientras que otras, consideran que la velocidad del viento varía con la altura, con lo que la presión será diferente para cada altura.

Sea una superficie S cualquiera (fig.24), la fuerza debida al viento será el producto de la presión por el área de la superficie expuesta al viento (proyección sobre un plano perpendicular a la dirección del viento de la superficie S). Si la velocidad del viento se considera uniforme, el punto de aplicación de esta fuerza estará en el baricentro o centro de presión de la superficie expuesta al viento, $F = P \cdot S \cdot \cos \hat{\theta}$.

En el caso de un buque de superficie, si suponemos que la velocidad del viento permanece paralela siempre al plano de la flotación, incidiendo transversalmente al buque, inicialmente la superficie expuesta al viento S , será la proyección de los di-



Fuente: www.flickr.com/photos/12435377@N08/16029209018/Vladimir_Pazmino

versos volúmenes (obra muerta más super-estructura) sobre el plano diametral. Sin embargo, a medida que el buque vaya escorándose habrá que proyectar la superficie S sobre un plano perpendicular a la dirección del viento, quedando: $S \cdot \cos \hat{\theta}$, donde $\hat{\theta}$ es el ángulo de escora.

Para que exista un momento es necesario que, a la acción del viento se le oponga una reacción igual y contraria, siendo el encargado de ejercer esta reacción la mar sobre la obra viva del buque. El punto de aplicación se en-

contrará situado en el centro de deriva; de todas formas, lo normal es simplificar y suponer que se localiza en un punto fijo sobre el plano diametral, a una altura sobre la quilla igual a la mitad del calado del buque adrizado.

A medida que el buque se vaya escorando (fig.25), el brazo de palanca será la proyección de la distancia d que separa ambos puntos de aplicación. Por lo tanto, observamos que, habrá dos proyecciones: una de la superficie expuesta al viento y otra del brazo de palanca.

El momento escorante, una vez sustituido el valor de F , será:

$$M_e = F \cdot d \cdot \cos \hat{\theta} \rightarrow F = P \cdot S \cdot \cos \hat{\theta} \rightarrow \boxed{M_e = P \cdot S \cdot d \cdot \cos^2 \hat{\theta}} \quad [52]$$

y el brazo escorante,

$$\boxed{B_E = \frac{M_e}{\Delta} = \frac{P \cdot S \cdot d \cdot \cos^2 \hat{\theta}}{\Delta}} \quad [53]$$

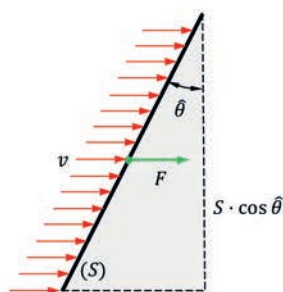


Fig. 24.

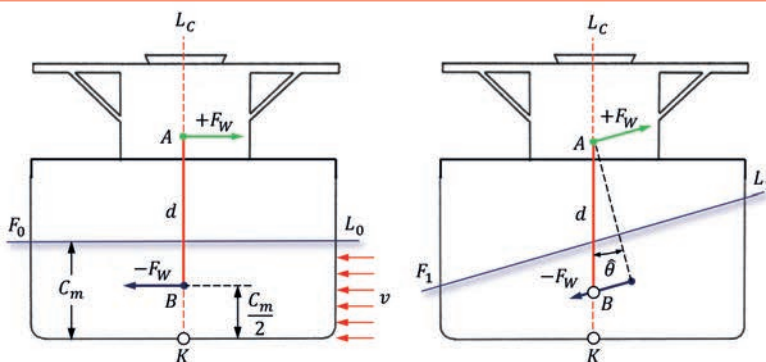


Fig. 25.

La fórmula (53) puede ser simplificada habitualmente suponiendo que el momento o el brazo escorante son constantes a lo largo de toda la escora del buque e igual a su valor máximo, entonces

$$\hat{\theta} = 0 \rightarrow \cos^2 \hat{\theta} = 1 \rightarrow M_e = P \cdot S \cdot d \quad [54]$$

$$B_E = \frac{P \cdot G \cdot Z}{\Delta} \quad [55]$$

3. Buque afectado por un momento escorante constante con balance.

En la (fig.26) hemos supuesto un viento que produce en el buque un momento escorante constante M_e , a lo largo de toda su eslora. Una vez que el buque alcance su equilibrio estático (punto A), se genera un balance a barlovento de $\hat{\theta}$ grados desde A. Cuando el buque se recupere a sotavento, lo hará hasta un ángulo de escora, representado por $\hat{\theta}_{Ed}$, donde se alcanza la condición de equilibrio dinámico (punto B).

Los datos de partida son: M_e , $\hat{\theta}$; con M_e se obtiene el punto A con su ángulo de escora permanente $\hat{\theta}_{Ep}$, y a partir de dicho ángulo, el punto D, con el ángulo de balance $\hat{\theta}$. Ahora ya se puede calcular el ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$, según los procedimientos mencionados anteriormente.

En este caso, la condición a imponer para el criterio de estabilidad será: $(\hat{\theta}_{Ed} < \hat{\theta}_{Cd})$ y $(\hat{\theta}_{Ed} < \hat{\theta}_f)$. Donde $\hat{\theta}_f$ representa al ángulo de inundación descendente o progresiva; es decir, el ángulo de escora al que se sumergen las aberturas del casco, superestructuras o casetas que no puedan cerrarse de modo estanco a la intemperie.

4. Buque afectado por viento de través y balance. Cuando alcanza un ángulo de escora determinado, se superpone una racha de viento que produce un aumento de su momento escorante (fig.27). Sea un buque en navegación sometido al efecto de un momento escorante inicial M_{e1} , cuyo punto de equilibrio permanente es A_1 , al que le corresponde el ángulo de escora $\hat{\theta}_0$; ahora vamos a suponer que:

a) A partir del punto A_1 , se produce una oscilación a barlovento hasta el ángulo de escora $\hat{\theta}_1$ (punto D).

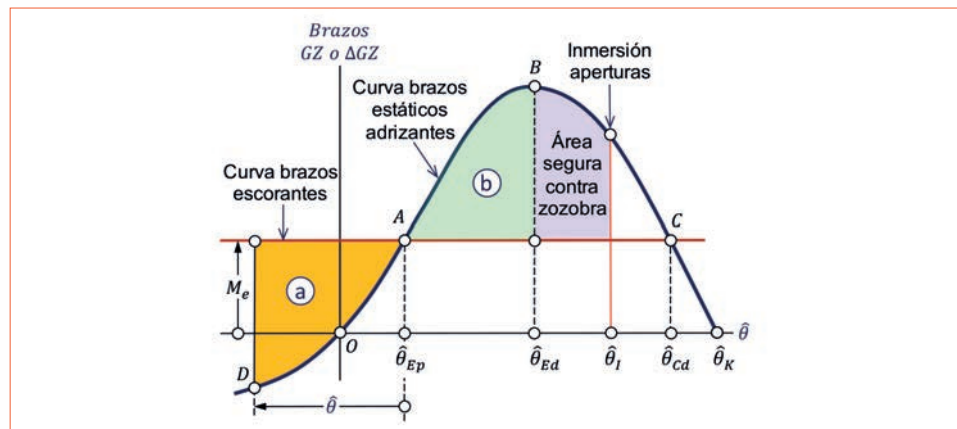


Fig. 26: Momento escorante constante con balance.

b) Cuando el buque ha alcanzado esta nueva posición, se superpone una racha de viento, aumentando el momento escorante hasta M_{e2} .

Lo que buscamos es determinar el punto B de equilibrio dinámico.

co. En este caso, vamos a simplificar el problema considerando que los dos momentos escorantes se mantienen constantes; su resolución se puede llevar a cabo utilizando el diagrama estático de estabilidad, o bien, el diagrama dinámico, veámoslo:

Trabajando con la curva de estabilidad estática transversal

- Trazamos la recta M_{e1} , que corta a la curva de estabilidad en el punto A_1 cuyo ángulo de equilibrio estático es $\hat{\theta}_0$.
- A partir del ángulo $\hat{\theta}_0$, trazamos el valor del ángulo $\hat{\theta}_1$, que es dato del problema, hallándose la posición del punto D.
- Se traza la recta M_{e2} , que corta a la curva de estabilidad estática en el punto A_2 , nuevo punto de equilibrio estático. Con estos datos calculamos el área "a".
- Llevando a cabo las interpolaciones del problema necesarias, encontraremos el punto B y su ángulo de equilibrio dinámico $\hat{\theta}_{Ed}$; para ello, imponemos la condición de igualdad de las áreas relativas o absolutas: " $a = b$ ".

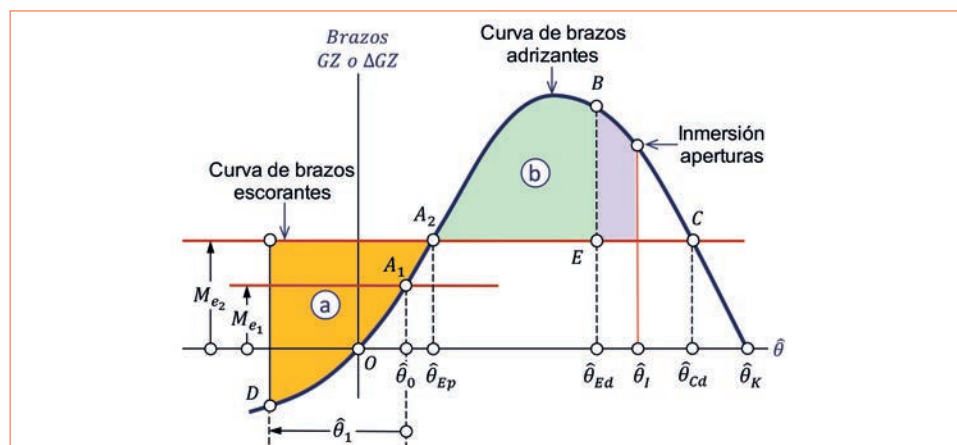


Fig. 27: Diagrama estático.

Trabajando con la curva de estabilidad dinámica adrizante (figs. 28 y 29)

- Utilizando el diagrama dinámico en combinación con el estático. En el segundo determinamos el punto de intersección A_1 y su correspondiente ángulo de equilibrio estático $\hat{\theta}_0$. Este ángulo lo llevamos a continuación al diagrama dinámico y obtenemos el punto A'_1 . Si se trabaja únicamente con el diagrama dinámico, tendremos que determinar el ángulo $\hat{\alpha}_1$ correspondiente al momento escorante M_{e1} , y con esta pendiente, localizar el punto de tangencia A'_1 utilizando el procedimiento habitual. El punto A'_1 nos facilita el valor del ángulo de partida $\hat{\theta}_0^{20}$.
- A partir de $\hat{\theta}_0$ se lleva el valor del intervalo de escora $\hat{\theta}_1$ a barlovento, obteniéndose el punto D'_1 .
- De forma análoga a la indicada se obtiene el punto A'_2 . Si solo utilizamos el diagrama dinámico habría que calcular la nueva pendiente $\hat{\alpha}_2$, correspondiente a M_{e2} , y con ella, el nuevo punto de tangencia a la curva de estabilidad dinámica A'_2 .
- Por el punto D'_1 levantamos una recta paralela, de pendiente $\hat{\alpha}_2$. El punto de corte con la curva dinámica será el punto B'_1 buscado, cuyo ángulo de escora $\hat{\theta}_{Ed}$ es el ángulo de equilibrio dinámico. La distancia vertical entre la recta $D'_1B'_1$ y su paralela, que pasa por el punto A'_2 , es el valor de las áreas relativas " $a = b$ ".

Resulta importante considerar que: la condición a imponer para cumplir con el criterio de estabilidad es: $\hat{\theta}_{Ed} < \hat{\theta}_{Cd}$ y $\hat{\theta}_{Ed} < \hat{\theta}_f$.

Para concluir destacamos que, los problemas que determinan las características de la estabilidad bajo

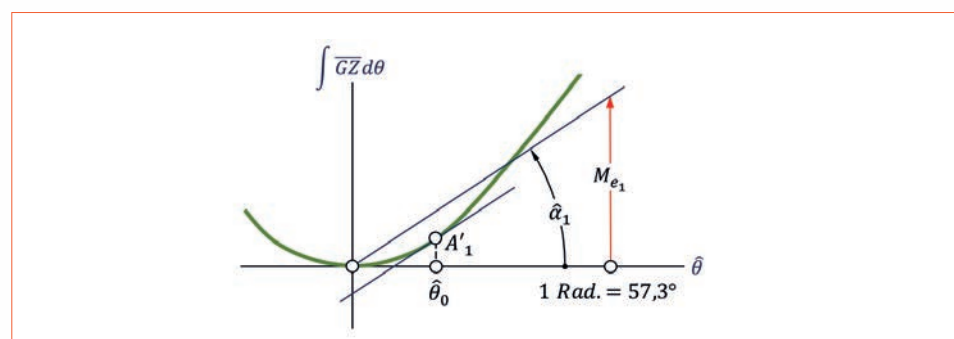


Fig. 28.

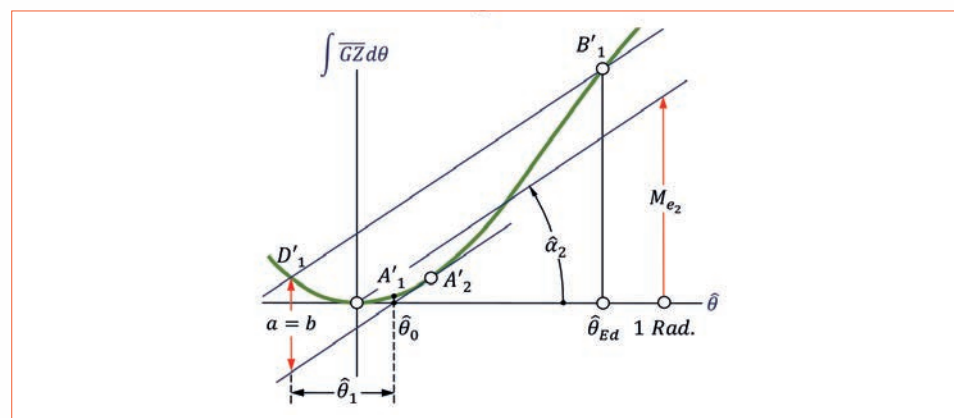


Fig. 29.

condiciones dinámicas en la mar aún permanecen insuficientemente investigados, a pesar de los avances obtenidos, tanto en trabajos teóricos como experimentales desarrollados en los últimos 20 años.

MOMENTO MÍNIMO DE VUELCO DE UN BUQUE AFECTADO DE BALANCE

En las condiciones de carga más desfavorables, desde el punto de vista de la estabilidad, el buque no debe dar la vuelta cuando esté sometido a la acción simultánea del viento y balance. Teniendo en cuenta el balance, el par de vuelco puede obtenerse en los diagramas de estabilidad estática o dinámica de dos formas diferentes:

- **Forma 1ª:** Las curvas de estabilidad estática y dinámica son normales o, la curva de estabilidad estática tiene un escalón y la de estabilidad dinámica una

fractura (fig.30). El par mínimo de vuelco se determina a partir del diagrama dinámico, fijando previamente un punto auxiliar A_1 . Para ello, llevamos sobre el eje de abscisas una longitud equivalente a la amplitud del ángulo de balance $\hat{\theta}_m^{21}$; por el punto obtenido, trazamos la ordenada cuya intersección con la curva de estabilidad dinámica facilita el punto buscado A_1 .

Por A_1 se traza una recta paralela al eje de abscisas, midiendo sobre ella la longitud $A_1 A_2$, igual al doble de la amplitud de balance ($A_1 A_2 = 2\hat{\theta}_m$) hacia la izquierda de A_1 .

El punto A_2 , simétrico de A_1 respecto al eje de ordenadas, se toma ahora como punto de partida o inicial de las siguientes líneas rectas:

- Se traza la recta tangente A_2C a la curva de estabilidad

20.- En el diagrama dinámico determinamos el ángulo $\hat{\alpha}$, para lo cual y sobre el eje de abscisas, justo en el punto $\hat{\theta} = 1$ radián, marcamos el valor del brazo o momento escorante, a continuación, lo unimos con el origen generándose dicho ángulo entre la recta trazada y el eje de abscisas. Con el valor de $\hat{\alpha}$ conocemos la pendiente que, en el diagrama dinámico, nos permitirá buscar las distintas tangentes geométricas que necesitamos.

21.- La determinación de $\hat{\theta}_m$ es función de $(r - a)$, de la manga, del calado, del coeficiente de fineza de la superficie de flotación, y de la clase de buque. Al definir el valor de esa inclinación, en ella también se ha incluido la condición de resonancia entre periodo de ola y del balance del buque, según una navegación standard, y para la relación adimensional, velocidad, eslora, igual a la unidad.

dinámica adrizante, partiendo del punto A_2 .

- La longitud $A_2B \approx 1$ radian ($57,3^\circ$), se lleva a partir del punto A_2 sobre la paralela al eje de abscisas.
- Por el punto B , se traza la recta perpendicular BE hasta su intersección con la recta tangente A_2C en el punto E .

El segmento BE representa el par mínimo de vuelco si la escala de ordenadas corresponde a los trabajos y el brazo de palanca mínimo de vuelco si esa escala representa los brazos de palanca. En este último caso, el par mínimo de vuelco M_v se obtiene multiplicando el valor del segmento BE en metros, por el correspondiente desplazamiento del buque, en toneladas:

$$M_v = \Delta \cdot BE \quad [56]$$

Cuando no se ha trazado la curva de estabilidad dinámica, el par mínimo de vuelco debe obtenerse en el diagrama de estabilidad estática, estableciendo la igualdad de los trabajos realizados por los pares escorante o de vuelco y adrizante, teniendo en cuenta la energía del balance. En este caso, la curva de estabilidad estática se prolonga en la región de las abscisas negativas sobre una longitud igual a la amplitud del ángulo de balance $\hat{\theta}_m$, y la línea recta MK , paralela al eje de abscisas, se determina mediante aproximaciones sucesivas hasta que sean iguales las áreas S_1 y S_2 .

La ordenada OA representa el par mínimo de vuelco, si la escala de ordenadas corresponde a los trabajos, y el brazo de palanca mínimo de vuelco si la escala corresponde a los brazos de palanca. En este último caso, el par mínimo de vuelco se obtiene multiplicando el valor del segmento OA , en metros, por el correspondiente desplazamiento del buque, en toneladas:

$$M_v = \Delta \cdot OA \quad [57]$$

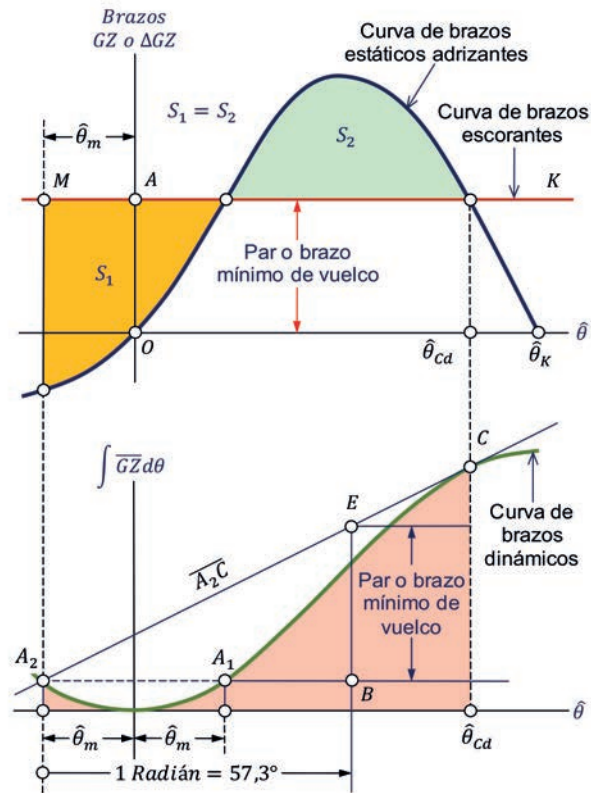


Fig. 30: Par mínimo de vuelco – Forma 1ª.

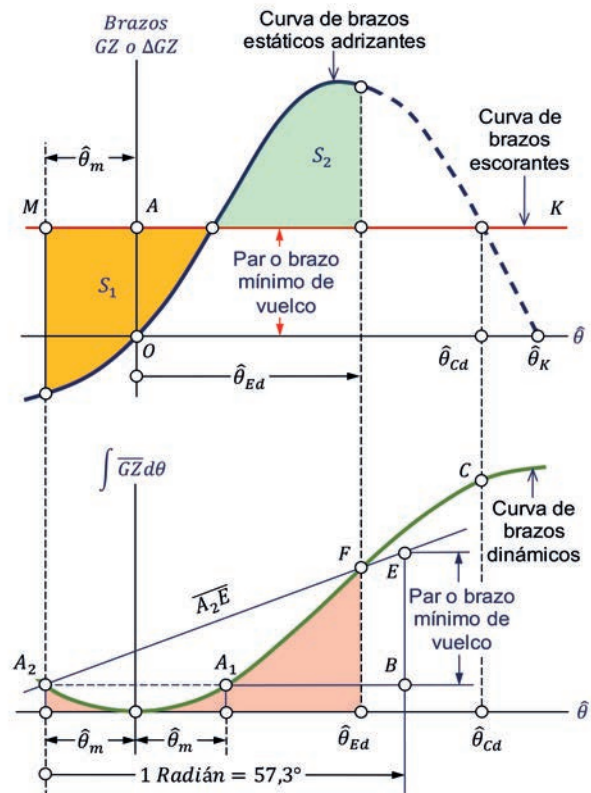


Fig. 31: Par mínimo de vuelco – Forma 2ª.

- **Forma 2ª:** Las curvas de estabilidad estática y dinámica deben interrumpirse en el ángulo de inclinación correspondiente al comienzo de la inmersión de las

aberturas consideradas como no estancas (fig.31).

Cuando se ha dibujado el diagrama de estabilidad dinámica,

el par mínimo de vuelco se determina de la forma siguiente: la posición del punto de partida se halla como se indicó en la forma 1ª. Desde este punto se traza una tangente A_2C a la curva de estabilidad dinámica; siendo esto solo posible cuando el ángulo de escora correspondiente al punto de tangencia sea inferior al ángulo de inundación. Para determinar el par mínimo de vuelco o el brazo de palanca debe hacerse también siguiendo los pasos indicados en la forma 1ª. Si no es posible trazar una tangente, entonces se traza una recta desde el punto A_2 hasta el F , donde la curva de estabilidad dinámica queda interrumpida.

- Desde el punto A_2 se traza una paralela al eje de abscisas y se lleva sobre ella el segmento A_2B igual a un radián ($57,3^\circ$).
- Desde B , trazamos una recta perpendicular BE al eje de abscisas hasta su intersección en el punto E con la recta inclinada A_2F .
- El segmento BE representa el par mínimo de vuelco o al brazo de palanca, en función de la escala seleccionada. En este último caso, el par mínimo de vuelco se deduce de la fórmula (56).

El par mínimo de vuelco para el ángulo de inclinación correspondiente al ángulo de inundación se obtiene en el diagrama de estabilidad estática de la forma siguiente: La curva de estabilidad estática se prolonga en la región de las abscisas negativas sobre una longitud igual al periodo de balance y se determina una recta MK , paralela al eje de abscisas, por aproximaciones sucesivas, de forma que sean iguales las áreas S_1 y S_2 .

La ordenada OA corresponde al par mínimo de vuelco o al brazo de palanca, en función de la escala escogida. En este último caso el par mínimo de vuelco se obtiene de la fórmula (57).

PROCEDIMIENTO PARA CÁLCULAR LOS VALORES DE LA ESTABILIDAD DINÁMICA DE UN BUQUE PARA DISTINTOS VALORES DE LA ORDENADA DE SU CENTRO DE GRAVEDAD

El método habitual de cálculo de la estabilidad dinámica para valores diferentes de KG consiste en calcular la curva de brazos de estabilidad estática e integrar los resultados. Sin embargo, se puede ahorrar mucho trabajo teniendo en cuenta la siguiente propiedad de la curva de brazos adrizantes:

En la (fig.32) se cumple que:

$$GZ = KN - KB = KN - KG \sin \hat{\theta}$$

Pero también se cumple que:

$$GZ = M_0P + GA = M_0P + GM_0 \sin \hat{\theta}$$

Resultando,

$$GZ = KN - KG \sin \hat{\theta} = M_0P + GM_0 \sin \hat{\theta} \quad [58]$$

$$A = \int_0^\theta GZ \cdot d\theta = \int_0^\theta KN \cdot d\theta - KG \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta = \int_0^\theta M_0P \cdot d\theta + GM_0 \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta \quad [59]$$

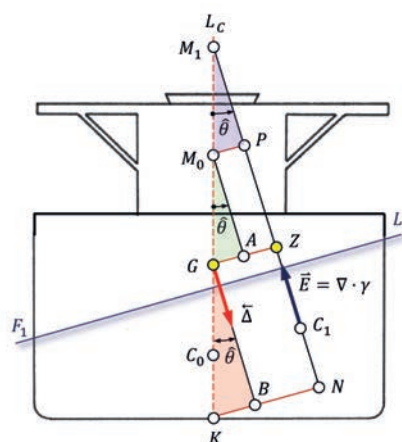


Fig. 32.

Como observamos, la ecuación (59) se deduce de la ecuación (58), puesto que los valores de KG y GM_0 son independientes del ángulo de inclinación, se puede poner KG y GM_0 en el segundo término fuera de la integral.

De acuerdo con lo indicado, se tiene para la diferencia de áreas bajo la curva de brazos adrizantes GZ hasta un valor límite determinado del ángulo de inclinación:

$$dA = \int_0^\theta (GZ)_2 \cdot d\theta - \int_0^\theta (GZ)_1 \cdot d\theta \quad \text{es decir,}$$

$$dA = -dKG \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta = dGM_0 \int_0^\theta \sin \hat{\theta} \cdot d\theta \quad [60]$$

La integral del segundo término del segundo miembro de la ecuación (60) debe calcularse entre los límites adecuados, siendo aplicables los siguientes valores:

Ángulos de escora	Valor de la integral
00° y 30°	0,13397
30° y 40°	0,09998
00° y 40°	0,23396
30° y $\hat{\theta}_f$	$0,86603 - \cos \hat{\theta}_f$
00° y $\hat{\theta}_f$	$1,00000 - \cos \hat{\theta}_f$

Si, por ejemplo, en un buque mercante cualquiera con un valor de KG igual a 10,2 metros, cambiará a otro valor igual a 10,3 metros, el área de la curva de brazos adrizantes GZ cambiará de la forma siguiente:

Ángulos de escora	Área para $KG = 10,2$	Variación del área	Área para $KG = 10,3$
00° y 30°	0,0745	-0,0134	0,0611
30° y 40°	0,0445	-0,0100	0,0345
00° y 40°	0,1190	-0,0234	0,0956

Como se observa, el buque sigue cumpliendo con los criterios de estabilidad dinámica.

A continuación, vamos a determinar "la altura metacéntrica mínima y de la ordenada máxima del centro de gravedad admisibles". De lo anterior se deduce que la determinación del valor mínimo admisible del GM_0 , y la del valor máximo admisible de KG , puede realizarse sin tener que efectuar largos y pesados cálculos, ya que la integral de KN es constante para unos valores determinados del calado y el asiento. El margen existente sobre los valores mínimos de la estabilidad dinámica fijados por los criterios para un valor dado de KG , o de GM_0 , determina el margen existente de estas magnitudes, KG , o GM_0 , y, por lo tanto, los valores límites de las mismas, para los que se cumplen los criterios sin margen alguno:

$$-dKG = dGM_0 = \frac{dA}{\int \sin \hat{\theta} d\theta}$$

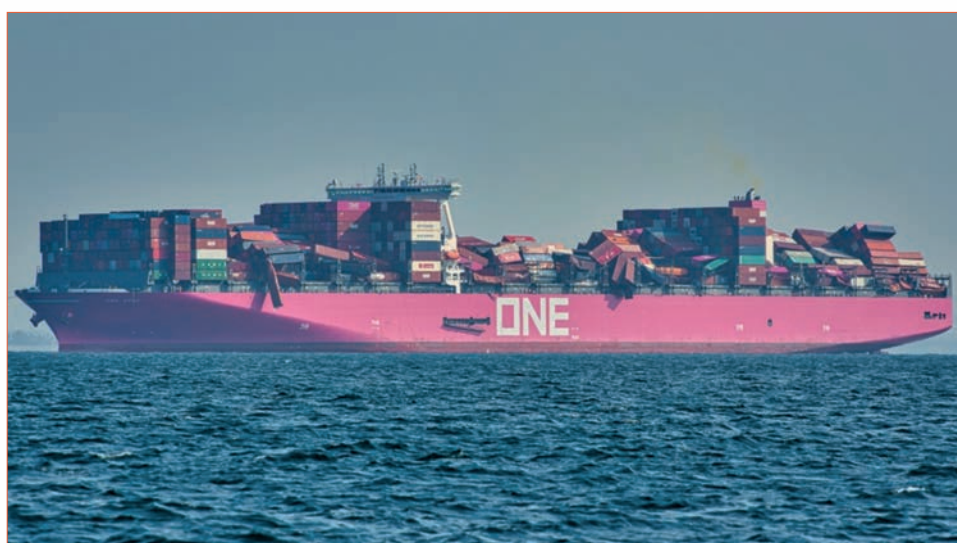
En el ejemplo anterior tenemos:

Ángulos de escora	Valor del criterio	Valor para: $KG = 10,2 \text{ m}$ $GM_0 = 0,4 \text{ m}$	dA	$\int \sin \hat{\theta} d\theta$	$-dGM_0 = -dKG$
00° y 30°	0,055 $m \times rad.$	0,0745 $m \times rad.$	- 0,0195 $m \times rad.$	0,134	0,146
30° y 40°	0,030 $m \times rad.$	0,0445 $m \times rad.$	- 0,0145 $m \times rad.$	0,100	0,145
00° y 40°	0,090 $m \times rad.$	0,1190 $m \times rad.$	- 0,0290 $m \times rad.$	0,234	0,124

De donde se deduce que, para este buque con estos valores de calado y asiento, el parámetro a considerar es la estabilidad dinámica entre 0° y 40°, siendo el mínimo GM admisible $0,4 - 0,124 = 0,276 \text{ m}$, y el máximo valor de $KG = 10,2 + 0,124 = 10,324 \text{ m}$.

Modo práctico de desarrollar la tabla exigida por la inspección de buques: Sabemos que la integral de KN en un intervalo de valores del ángulo de inclinación $\hat{\theta}$ es una propiedad geométrica del calado medio y el asiento o, lo que es lo mismo, de los calados a proa y a popa para un buque determinado; es decir, que es independiente de los valores de la ordenada del centro de gravedad y de la altura metacéntrica inicial.

Al efectuar los cálculos de la estabilidad de formas (curvas hidrostáticas y de brazos de palanca KN) puede calcularse el valor de la integral $\int KN d\theta$ entre los límites 0° y 30°, entre 0° y 40° y entre 30° y 40° (o bien, entre 30° y el ángulo de comienzo de la inundación a través de las aberturas, si éste es menor de 40°) para una serie de valores del calado medio y el asiento. El valor máximo de KG para los calados de que se trata se obtiene mediante la fórmula:



Fuente: Supply Chain Brain – Photo: Bloomberg – April 29, 2021.

$$KG_{mx} = \frac{\int_0^{\theta} KN \cdot d\theta - \text{Valor del criterio}}{\int_0^{\theta} \sin \hat{\theta} \cdot d\theta} \quad [61]$$

Donde, el "valor del criterio" será 0,055 $m \cdot rad$, 0,030 $m \cdot rad$ o 0,09 $m \cdot rad$, según se trate de la integral del KN entre 0° y 30°, entre 30° y 40° (o el ángulo de inundación) o entre 0° y 40° (o el ángulo de inundación).

CÁLCULO Y TRAZADO DE LA CURVA DE ESTABILIDAD DINÁMICA

Supongamos un buque adrizado y en equilibrio estable. Si aplicamos una fuerza exterior perpendicular a su plano diametral, el buque se escora realizando un trabajo, ya que al escorarse el punto de aplicación de la fuerza se habrá desplazado y el trabajo hecho por la fuerza sobre el buque es el producto de la magnitud de la fuerza por la distancia que se ha desplazado el punto de aplicación de dicha fuerza²². El trabajo realizado por el buque acumula una energía potencial, pero al cesar la aplicación de la fuerza mencionada, transforma dicho trabajo en energía cinética o dinámica, que se manifiesta por los balances que dará hasta quedar en reposo. La fuerza aplicada al buque es una fuerza variable, entonces tenemos un trabajo realizado por una fuerza de este tipo. Este trabajo se calcula integrando, entre el intervalo de distancia de aplicación de la fuerza, el valor de dicha fuerza; pero la fuerza aplicada no es otra que el producto del desplazamiento por el brazo adrizante GZ , ya que es precisamente el valor del par de estabilidad lo que se trata de vencer, y el intervalo de integración es la distancia en grados o radianes, entre el origen de la curva de estabilidad estática y el ángulo crítico o ángulo para el que se anula dicha estabilidad estática. Como los valores de $\Delta \cdot GZ$ no son constantes, y esto es precisamente la fuerza estática que se trata de vencer, de ahí resulta la expresión de la integral. Por lo tanto, el valor de la estabilidad dinámica total será el facilitado por la siguiente expresión:

$$\int_0^{\theta_K} \Delta \cdot GZ \cdot d\theta \quad [62]$$

Cuando en la escala de las ordenadas de la curva de estabilidad estática, vienen los valores de los brazos GZ en metros o milímetros, la expresión (62) queda reducida a



Fuente: Matt Cardy/Getty Images.

$$\int_0^{\theta_K} GZ \cdot d\theta \quad [63]$$

Como son desconocidas las expresiones integrales anteriores, es necesario calcular dicha área mediante los procedimientos de integración aproximados, métodos de los Trapecios y de Simpson. Normalmente y sin descartar el método de Simpson, las oficinas técnicas de los astilleros utilizan el método de los Trapecios, por considerar que cuenta con la exactitud suficiente además de simplificar mucho el cálculo. Estas oficinas técnicas suelen usar la misma escala para trazar las curvas estática y dinámica, aprovechando los mismos ejes coordenados, superponiendo la curva de estabilidad dinámica sobre la curva de estabilidad estática. Destacar que, ambas curvas pueden representarse también separadas verticalmente, una encima de la otra, siendo la superior la de estabilidad estática.

Normalmente, en la curva de estabilidad estática los valores de los brazos estáticos GZ , vienen expresados en metros o en milímetros, y los valores de los brazos de palanca o momento dinámico de la curva

dinámica $\Delta \cdot GZ$, en metros o milímetros por radianes (lo habitual es que, el resultado de la curva de brazos venga en milímetros por radianes). En el caso de venir la escala de la curva de estabilidad estática en tonelámetros, la curva de estabilidad dinámica vendría en tonelámetros por radianes o toneladas por milímetro y por radianes.

El procedimiento de cálculo consiste en preparar un cuadro esquemático donde, en primer lugar y en función de los brazos calculemos las ordenadas que generan la curva de estabilidad estática y, en segundo lugar, definamos las escoras y ordenadas intermedias para obtener los brazos dinámicos adrizantes y con ellos, trazar la curva de estabilidad dinámica.

Cálculo de la curva de estabilidad dinámica

Para calcular el área, dividimos la curva de estabilidad estática en una serie de trapecios o intervalos, cuya separación entre ordenadas sea de 5° , 10° o 15° (los astilleros recomiendan un intervalo máximo de 10° , hasta una escora de 40° , a continuación, se puede aumentar el

22.- El área limitada por la curva de estabilidad estática y el eje de abscisas, entre dos ángulos de escora determinados, representa el trabajo realizado o la energía proporcionada por el par resistente o adrizante para oponerse al par motor o escorante que genera la escora.

intervalo al necesitarse menor precisión); a continuación, levantamos perpendiculares, al eje de abscisas, por los valores angulares con el intervalo seleccionado (fig.33).

Trabajando de la forma indicada, obtendremos los siguientes trapecios: $OA_1 B_1$ (aparentemente es un triángulo, por comenzar en el origen), $A_1 B_1 B_2 A_2$, $A_2 B_2 B_3 A_3$, $A_3 B_3 B_4 A_4$, $A_4 B_4 B_5 A_5$, por último nos queda el ultimo trapecio $A_5 B_5 \hat{\theta}_K$, que en realidad es un triángulo y presenta el inconveniente de contar con una altura diferente a la de los demás; para calcularla, se resta del valor del ángulo crítico $\hat{\theta}_K$ el valor del ángulo de escora correspondiente a la última ordenada ($A_5 B_5$), siendo esta diferencia, la altura en grados que deberá ser reducida a radianes de la forma ya conocida.

Para cada trapecio, conocemos las ordenadas GZ o ΔGZ que limitan la separación entre ellas o altura, por lo que, podemos calcular su área directamente y obtener el valor de la estabilidad dinámica para el intervalo de ángulos de escora en que se encuentre dicho trapecio. Así, la estabilidad dinámica entre los ángulos de escora de 15° y 30° (dinámica parcial de 30°) es el va-

El proceso de cálculo de cada trapecio será el siguiente: Trabajemos con el trapecio $A_1 B_1 B_2 A_2$, su base menor es $A_1 B_1$, que es igual al brazo estático GZ para una escora de 15° ; su base mayor es $B_2 A_2$, que es igual al valor del brazo GZ estático para 30° ; nos queda obtener su altura, $B_1 B_2$, o sea 15° , que equivalen a:

$$1^\circ = \frac{\pi}{180} = \frac{3,14159}{180} = 0,01745 \rightarrow 15^\circ = 0,26180 \text{ rad.}$$

Finalmente, el área buscada expresada en metros por radianes será:

$$DP_{30^\circ} = \left(\frac{A_1 B_1 + A_2 B_2}{2} \right) \cdot B_1 B_2 = \left(\frac{GZ_{15^\circ} + GZ_{30^\circ}}{2} \right) \cdot 0,26180$$

El área de los trapecios primero y último, que en realidad son triángulos, se calculan como se indica,

$$\text{Área primera} = \left(\frac{O + A_1 B_1}{2} \right) \cdot OB_1 \quad \text{Área última} = \left(\frac{A_5 B_5 + \hat{\theta}_K}{2} \right) \cdot B_5 \hat{\theta}_K$$

Si lo que deseamos ahora es conocer el valor de la “estabilidad dinámica total” que tendrá el buque entre el origen y un ángulo de escora determinado, por ejemplo $B_3 = 45^\circ$, debemos calcular, y a continuación sumar progresivamente, las áreas de los trapecios $OA_1 B_1$, $A_1 B_1 B_2 A_2$ y $A_2 B_2 B_3 A_3$, aplicando el desarrollo siguiente:

$$DT_{45^\circ} = \left(\frac{O + A_1 B_1}{2} \right) \cdot 0,26180 + \left(\frac{A_1 B_1 + A_2 B_2}{2} \right) \cdot 0,26180 + \left(\frac{A_2 B_2 + A_3 B_3}{2} \right) \cdot 0,26180$$

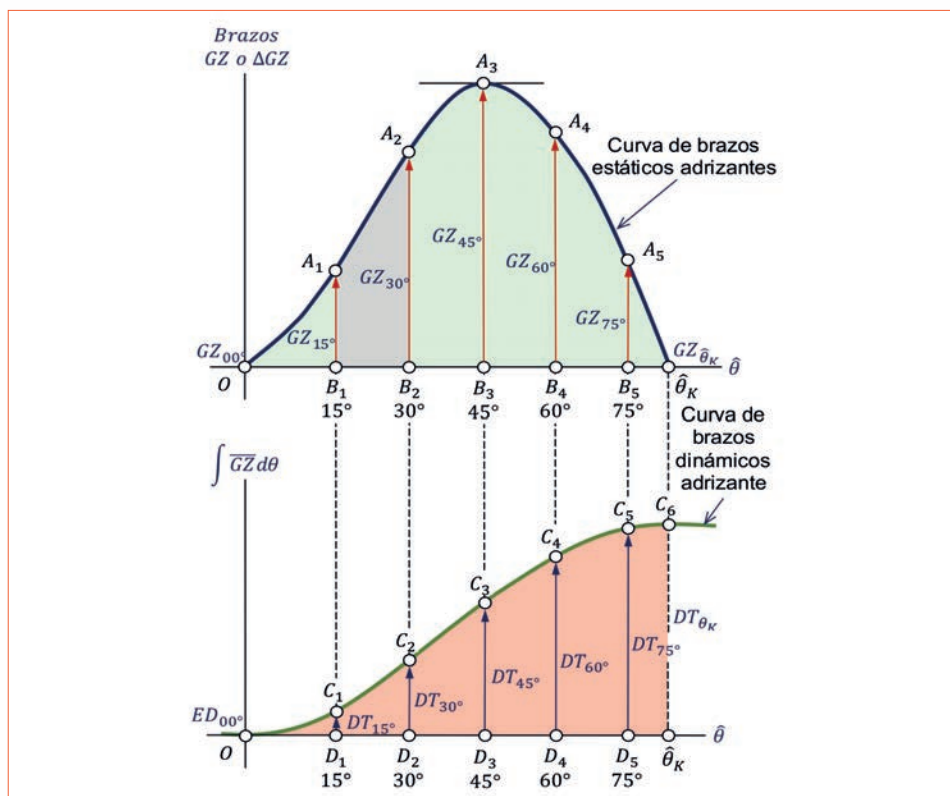


Fig. 33: Curvas de estabilidad estática y dinámica.

lor del área del trapecio $A_1 B_1 B_2 A_2$. Si se quiere saber la estabilidad dinámica total que tendrá el buque para 45° de escora no habrá mas que calcular el área $OA_3 B_3$, o bien, sumar las áreas de los trapecios $OA_1 B_1$, $A_1 B_1 B_2 A_2$ y $A_2 B_2 B_3 A_3$.

El procedimiento más utilizado para calcular la “estabilidad dinámica total” para un ángulo de escora determinado, consiste en sumar al brazo dinámico total de la escora anterior el brazo dinámico parcial de la escora seleccionada, quedando reflejado en la columna “dinámica total” del cuadro: $DT_{45^\circ} = DT_{30^\circ} + DP_{40^\circ}$.

Las unidades utilizadas para expresar los brazos o momentos dinámicos son las siguientes:

- Si las ordenadas de la curva de estabilidad estática están trazadas en metros (m), la curva de estabilidad dinámica utilizará brazos dinámicos en metros por radianes (m · rad). Si las ordenadas se trazan en milímetros (mm), los brazos dinámicos vendrán en milímetros por radianes (mm · rad).
- Si las ordenadas de la curva de estabilidad estática se trazan en toneladas por metro (tns · m), la curva de estabilidad dinámica utilizará brazos dinámicos en toneladas por metros y por radianes (tns · m · rad). Si las ordenadas se trazan en toneladas por milímetro

($\text{tns} \cdot \text{mm}$), los brazos dinámicos vendrán expresados en toneladas por milímetros y por radianes ($\text{tns} \cdot \text{mm} \cdot \text{rad}$).

Cuadro esquemático para calcular la estabilidad dinámica

Estudiamos el cuadro de cálculo usado por las oficinas técnicas de los astilleros para calcular la curva de estabilidad dinámica de un buque de superficie. Vamos a utilizar dos tipos de cuadros de calculo en función de la condición en que se encuentre el buque, veámoslos:

- **Cuadro 1 - Buque adrizado y estable (fig.34).** En este caso el buque se encuentra sin escora con su centro de gravedad sobre el plano diametral; para obtener la curva de estabilidad dinámica, en el cuadro de cálculo se dispondrán las siguientes columnas:
 - **Columna ángulos de escora $\hat{\theta}$.** Recoge los diferentes ángulos de escora seleccionados para el trazado de los brazos estáticos GZ ; los espacios entre ordenadas suelen ser prácticamente constantes.
 - **Columna brazos KN .** Sus valores se localizan en las curvas de brazos KN o pantocarenas para diferentes ángulos de

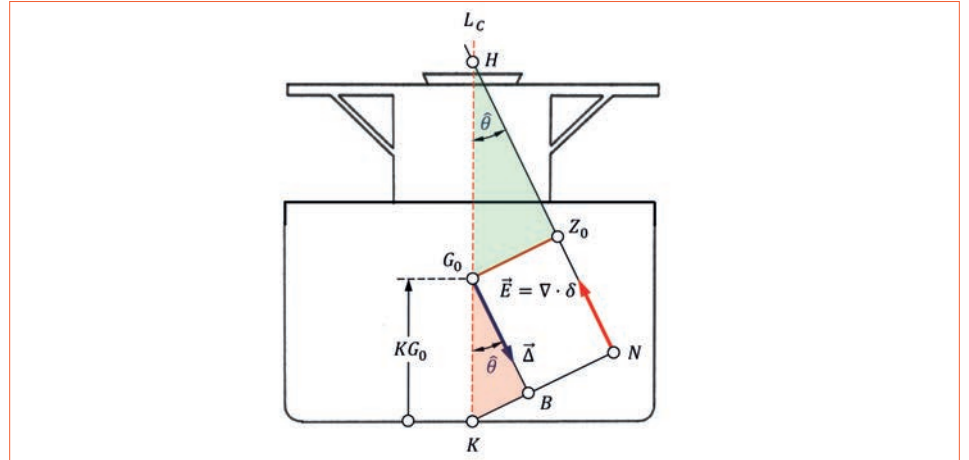


Fig. 34: Buque adrizado.

escora entrando con el desplazamiento del buque.

- **Columna $KG \cdot \sin \hat{\theta}$.** Para distintos ángulos de escora, esta ecuación nos facilita el valor de la base del triángulo rectángulo G_0BK en la figura de referencia.
- **Columna GZ .** Aquí se recopilan todos los valores de los brazos estáticos adrizantes GZ en función del ángulo de escora: $GZ_n = KN_n - KG \cdot \sin \hat{\theta}$.
- **Columna de brazos estáticos adrizantes promedios GZ_{pr} .** Recoge los valores de los brazos estáticos adrizantes GZ obtenidos al aplicar,

$$GZ_{pr} = \frac{GZ_n + GZ_{n-1}}{2}$$

- **Columna altura o intervalo.** Altura de los trapecios de subdivisión utilizados en radianes.

$$05^\circ = 0,01745 \cdot 05 = 0,08727 \text{ rad.}$$

$$10^\circ = 0,01745 \cdot 10 = 0,17453 \text{ rad.}$$

$$15^\circ = 0,01745 \cdot 15 = 0,26180 \text{ rad.}$$

- **Columna dinámica parcial DP .** Para cada escora, se obtiene multiplicando el brazo adrizante promedio correspondiente por la altura o intervalo en radianes: es decir, $DP_x = GZ_{pr} \cdot \text{Altura}$.

- **Columna dinámica total DT .** Para un ángulo de escora determinado, se obtiene sumando al brazo dinámico total de la escora anterior, el brazo

Estabilidad Dinámica (buque adrizado) – Método de los Trapecios							
$\hat{\theta}$	a KN (m)	b KG · sin $\hat{\theta}$ (m)	c = a - b GZ (m)	d = $c_n + c_{n-1}/2$ GZ _{pr} (m)	e Altura (rad)	f = d · e Dinámica Parcial (m · rad)	$g_n = g_{n-1} + f_n$ Dinámica Total (m · rad)
00°	KN ₀₀	KG · sin 00°	GZ ₀₀				
10°	KN ₁₀	KG · sin 10°	GZ ₁₀	$\frac{GZ_{10} + GZ_{00}}{2}$	0,17453	$DP_{10} = \frac{GZ_{10} + GZ_{00}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{10} = DT_{00} + DP_{10}$
20°	KN ₂₀	KG · sin 20°	GZ ₂₀	$\frac{GZ_{20} + GZ_{10}}{2}$	0,17453	$DP_{20} = \frac{GZ_{20} + GZ_{10}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{20} = DT_{10} + DP_{20}$
30°	KN ₃₀	KG · sin 30°	GZ ₃₀	$\frac{GZ_{30} + GZ_{20}}{2}$	0,17453	$DP_{30} = \frac{GZ_{30} + GZ_{20}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{30} = DT_{20} + DP_{30}$
40°	KN ₄₀	KG · sin 40°	GZ ₄₀	$\frac{GZ_{40} + GZ_{30}}{2}$	0,17453	$DP_{40} = \frac{GZ_{40} + GZ_{30}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{40} = DT_{30} + DP_{40}$
50°	KN ₅₀	KG · sin 50°	GZ ₅₀	$\frac{GZ_{50} + GZ_{40}}{2}$	0,17453	$DP_{50} = \frac{GZ_{50} + GZ_{40}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{50} = DT_{40} + DP_{50}$
60°	KN ₆₀	KG · sin 60°	GZ ₆₀	$\frac{GZ_{60} + GZ_{50}}{2}$	0,17453	$DP_{60} = \frac{GZ_{60} + GZ_{50}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{60} = DT_{50} + DP_{60}$
70°	KN ₇₀	KG · sin 70°	GZ ₇₀	$\frac{GZ_{70} + GZ_{60}}{2}$	0,17453	$DP_{70} = \frac{GZ_{70} + GZ_{60}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{70} = DT_{60} + DP_{70}$

dinámico parcial de la escora seleccionado. También puede hallarse mediante la suma progresiva de los datos reflejados en la columna dinámica parcial entre el origen y la ordenada que pasa el ángulo de escora buscado.

$$DT_{40^\circ} = DT_{30^\circ} + DP_{40^\circ}$$

$$DT_{40^\circ} = DP_{10^\circ} + DP_{20^\circ} + DP_{30^\circ} + DP_{40^\circ}$$

- **Cuadro 2 – Buque con escora permanente (fig.35).** Cuando un buque tiene su centro de gravedad fuera del plano diametral, su coordenada transversal será distinta de cero, adquiriendo el signo positivo o negativo según G_1 se encuentre a estribor o babor de la línea de crujía. Debido a ello, el buque se encontrará afectado por un ángulo de escora permanente. Si en esta condición, el buque se ve afec-

tado por una fuerza exterior que lo obliga a sobrepasar su ángulo de escora permanente, se balanceará hasta que debido al rozamiento quede nuevamente parado sobre su ángulo de escora permanente.

Este problema lo resolvemos

calculando las curvas de estabilidad estática y dinámica tanto adrizante como escorante. Teniendo presente que, al trazarlas el punto de corte de las curvas estáticas genera el ángulo de equilibrio estático, y el de las curvas dinámicas el ángulo de equilibrio dinámico.

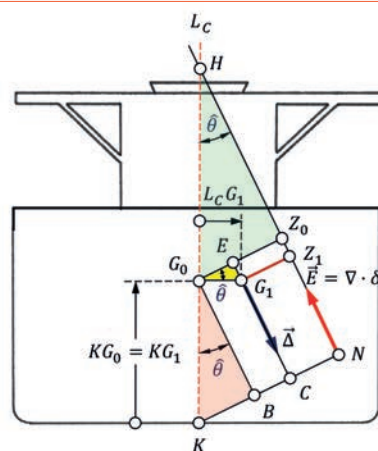


Fig. 35: Buque con escora permanente.

En la figura de referencia se conocen los datos siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} G_0G_1 = L_cG_1 \\ KB = KG_0 \cdot \sin \hat{\theta} \\ G_0E = G_0G_1 \cdot \cos \hat{\theta} = L_cG_1 \cdot \cos \hat{\theta} \\ G_0Z_0 = KN - KB \end{array} \right\} \rightarrow G_1Z_1 = G_0Z_0 - G_0E = KN - KB - G_0E = KN - KG_0 \cdot \sin \hat{\theta} - L_cG_1 \cdot \cos \hat{\theta}$$

Estabilidad Dinámica (buque con escora permanente) – Método de los Trapecios

$\hat{\theta}$	a KN (m)	b KG · sin $\hat{\theta}$ (m)	c $L_cG \cdot \cos \hat{\theta}$ (m)	$d = a - b - c$ GZ (m)	$e = f_n + f_{n-1}/2$ GZ _{Pr} (m)	g Altura (rad)	$h = e \cdot g$ Dinámica Parcial (m · rad)	$i_n = i_{n-1} + h_n$ Dinámica Total (m · rad)
00°	KN ₀₀	KG · sin 00°	$L_cG \cdot \cos 00^\circ$	GZ ₀₀				
10°	KN ₁₀	KG · sin 10°	$L_cG \cdot \cos 10^\circ$	GZ ₁₀	$\frac{GZ_{10} + GZ_{00}}{2}$	0,17453	$DP_{10} = \frac{GZ_{10} + GZ_{00}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{10} = DT_{00} + DP_{10}$
20°	KN ₂₀	KG · sin 20°	$L_cG \cdot \cos 20^\circ$	GZ ₂₀	$\frac{GZ_{20} + GZ_{10}}{2}$	0,17453	$DP_{20} = \frac{GZ_{20} + GZ_{10}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{20} = DT_{10} + DP_{20}$
30°	KN ₃₀	KG · sin 30°	$L_cG \cdot \cos 30^\circ$	GZ ₃₀	$\frac{GZ_{30} + GZ_{20}}{2}$	0,17453	$DP_{30} = \frac{GZ_{30} + GZ_{20}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{30} = DT_{20} + DP_{30}$
40°	KN ₄₀	KG · sin 40°	$L_cG \cdot \cos 40^\circ$	GZ ₄₀	$\frac{GZ_{40} + GZ_{30}}{2}$	0,17453	$DP_{40} = \frac{GZ_{40} + GZ_{30}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{40} = DT_{30} + DP_{40}$
50°	KN ₅₀	KG · sin 50°	$L_cG \cdot \cos 50^\circ$	GZ ₅₀	$\frac{GZ_{50} + GZ_{40}}{2}$	0,17453	$DP_{50} = \frac{GZ_{50} + GZ_{40}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{50} = DT_{40} + DP_{50}$
60°	KN ₆₀	KG · sin 60°	$L_cG \cdot \cos 60^\circ$	GZ ₆₀	$\frac{GZ_{60} + GZ_{50}}{2}$	0,17453	$DP_{60} = \frac{GZ_{60} + GZ_{50}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{60} = DT_{50} + DP_{60}$
70°	KN ₇₀	KG · sin 70°	$L_cG \cdot \cos 70^\circ$	GZ ₇₀	$\frac{GZ_{70} + GZ_{60}}{2}$	0,17453	$DP_{70} = \frac{GZ_{70} + GZ_{60}}{2} \cdot 0,17453$	$DT_{70} = DT_{60} + DP_{70}$

La tabla de cálculo se construye de forma idéntica a la descrita en el punto primero, con la salvedad de que en este caso interviene la columna “c” separación entre el centro de gravedad y la línea de crujía. Esto produce que, en este caso la columna GZ se confeccione aplicando la siguiente expresión:

$$GZ_n = KN_n - KG \cdot \sin \hat{\theta} - L_cG \cdot \cos \hat{\theta}$$

Representación gráfica de la curva de estabilidad dinámica

Habitualmente, la curva de estabilidad dinámica se traza usando un sistema de coordenadas cartesianas rectangulares, el eje de las abscisas está destinado a los ángulos de escora que puede alcanzar un buque durante su balance, debido a ello, su escala vendrá en grados sexagesimales; en el eje de ordenadas se representan los brazos que pueden ser: a) si trabajamos con brazos dinámicos, la escala vendrá marcada en milímetros o metros por radianes, y b) si trabajamos con momentos dinámicos, la escala estará graduada en tonelámetros por radianes. En la gran mayoría de los casos se trabaja habitualmente con los brazos.

La curva de estabilidad dinámica se representa gráficamente de dos formas diferentes, siendo ambas totalmente válidas:

- Sobre el sistema de ejes coordenados utilizado para representar la curva de estabilidad estática, superponiendo una curva sobre la otra, teniendo la precaución de graduar debidamente el eje de ordenadas para evitar errores de lectura y trazado.
- Disponiendo ambas curvas por separado una encima de la otra, situando a la curva de estabilidad estática justo por encima de la curva de estabilidad dinámica haciendo coincidir los orígenes y los ángulos de escora de ambas curvas.

Para trazar la curva de estabilidad dinámica utilizaremos los valores de los brazos dinámicos adrizantes totales, cuyo método de trazado es el siguiente:

- Los valores de (DP_{10}) , $(DP_{10} + DP_{20})$, $(DP_{10} + DP_{20} + DP_{30})$, $(DP_{10} + DP_{20} + DP_{30} + DP_{40})$, etc., se llevan a las ordenadas levantadas por los ángulos de escora correspondientes, cuyos valores representan los puntos DT_{10} , DT_{20} , DT_{30} , DT_{40} , DT_{50} , etc.
- La envolvente de los puntos

DT_{10} , DT_{20} , DT_{30} , DT_{40} , DT_{50} , etc. representa la curva de estabilidad dinámica.

FUNDAMENTOS DEL CRITERIO METEOROLÓGICO O DE VIENTO Y BALANCE INTENSOS

Henry Moseley, se anticipó a los tiempos al introducir el concepto de estabilidad dinámica en 1850 en su memoria titulada *“On the Dynamical Stability and on the Oscillations of Floating Bodies”* donde expuso las bases para el empleo del balance energético. En 1935 Pierrottet (sin citar a Moseley) utilizó el método del balance energético para presentar un criterio de estabilidad para buques donde se consideró el efecto de las olas y el viento, la aglomeración de pasajeros en una banda, el ángulo de escora debido a una maniobra de evolución y la estabilidad en inundación. A partir del criterio de Pierrottet y debido al vuelco del buque *“Toya Maru”* en 1954, Japón desarrolló un criterio meteorológico que fue el estándar que constituyó la base del actual criterio.

El criterio de viento y balance intensos o criterio meteorológico es una de las disposiciones de carácter general del Código de Estabilidad sin Avería de 2008. El objetivo original de la elaboración de este criterio era

evitar la zozobra de los buques que pierden completamente la propulsión y el gobierno con vientos severos y olas de gran tamaño, situación conocida como *“buque muerto”*. En el caso de los buques que no tienen velocidad de avance, se da por entendido que se encuentran en una condición de viento y olas irregulares de través. En consecuencia, los aspectos operacionales de la estabilidad se consideran independientemente de este criterio, y se tratan en la *“Orientación revisada que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas en condiciones meteorológicas y estados de la mar adversos”* (MSC.1/Circ.128), situaciones en las cuales, al realizar determinadas operaciones, los buques están expuestos a un mayor riesgo de zozobra que con mar de través.

El criterio meteorológico hizo su primera aparición en los instrumentos de la IMO en el Acta final del Convenio Internacional de Torremolinos para la Seguridad de los Buques Pesqueros en 1977. Durante las deliberaciones sobre la elaboración del Convenio de Torremolinos, se señaló la limitación del criterio de la curva de brazos *GZ* haciendo referencia a la resolución A.168(ES. IV); éste se basa en experiencias realizadas exclusivamente con buques pesqueros en zonas marítimas limitadas y no es posible extender su aplicabilidad a otros tipos de buques ni a otras



Fuente: The Royal Gazette. Sékou Hendrickson Oct 29,2021

condiciones meteorológicas. Por ello, en vez de adoptar el criterio de la curva *GZ*, el Convenio de Torremolinos adoptó el criterio de viento y balance intenso, y se incluyeron directrices para el cálculo. Esta nueva disposición se basa en la norma japonesa de estabilidad para los buques de pasaje.

El criterio de la curva o brazos *GZ* para los buques de pasaje y de carga, resolución A.167(ES. IV), suscitó críticas similares en la Organización Consultiva Marítima Intergubernamental (OCMI). Se consideró que, como mucho, la resolución A.167(ES. IV) sería aplicable a los buques de eslora igual o inferior a **100 metros** debido a la limitación de datos estadísticos disponibles de la fuente. Por consiguiente, en la resolución A.562(14) de 1985, se adoptó un criterio meteorológico para los buques de pasaje y de carga y para los buques pesqueros de eslora igual o superior a **45 metros**. Este nuevo criterio refleja en gran parte la norma de estabilidad japonesa para buques de pasaje, pero utiliza la fórmula de cálculo rusa para el ángulo de balance. Referente a los buques pesqueros más pequeños, en 1991 se adoptó la resolución A.685(17). En esta resolución se introdujo el gradiente de velocidad del viento al aproximarse a la superficie de la mar, en consonancia con la norma rusa. En 1993 se adoptó el Código de Estabilidad sin Avería mediante la resolución A.749(18), revocándose todas las disposiciones anteriores.

El principio básico del criterio meteorológico es el equilibrio de energía entre la escora producida por el viento de través y los momentos adrizantes teniendo en cuenta el movimiento de balance. Piorrottet (1935) es uno de los pioneros en el estudio de este método de equilibrio de energía. Como se muestra en la (fig.36), la energía necesaria para la recuperación es superior a la que resulta del momento escorante provocado por el viento. Como no se tiene en cuenta el movimiento de balance, se supone que los buques quedan expuestos súbitamente a un momento escorante provocado por el viento estando completamente adrizados. Este concepto fue utilizado en las prescripciones provisio-

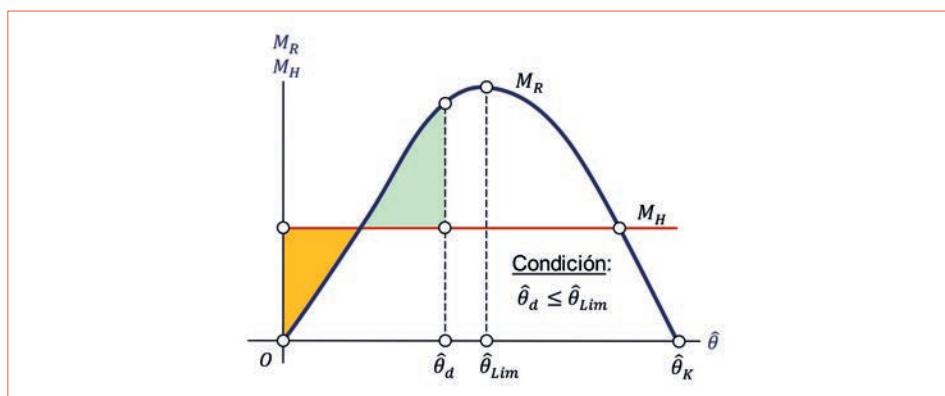


Fig. 36: Método de equilibrio de energía usado por Piorrottet (1935).

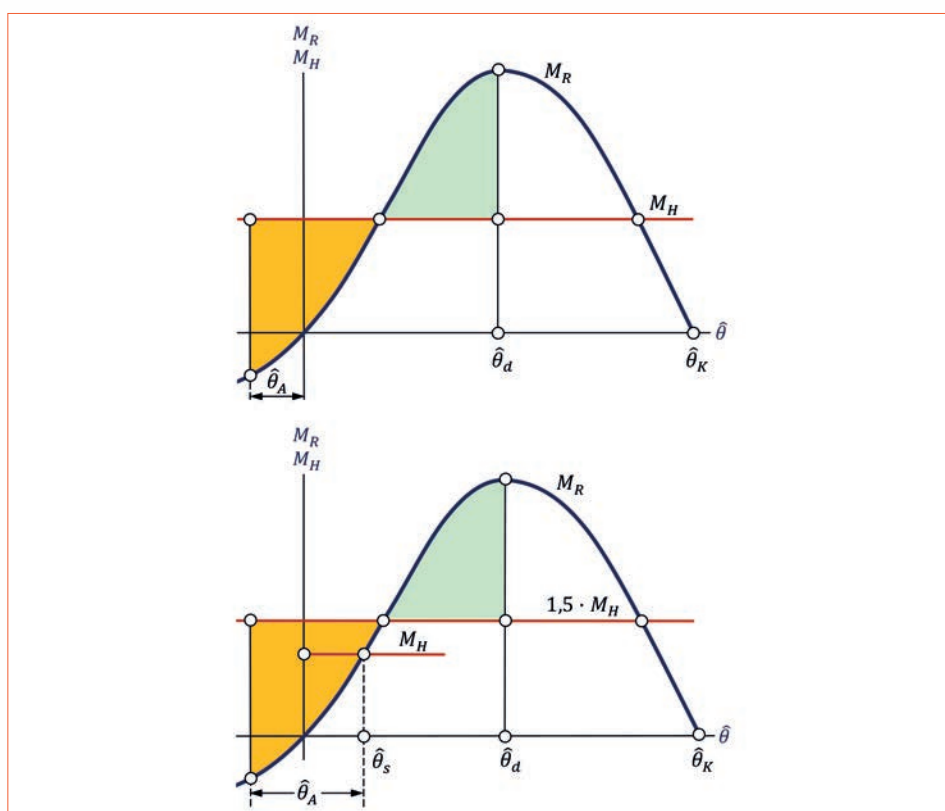


Fig. 37: Métodos de equilibrio de energía según la norma rusa (fig. superior) y la japonesa (fig. inferior).

nales de estabilidad de Rusia y, posteriormente, por Polonia, Rumanía, Alemania y China.

En Japón, el método de equilibrio de energía se aplicó para incluir el movimiento de balance y para distinguir entre los vientos constantes y los vientos con ráfagas (fig.37), y posteriormente se adoptó como principio básico de la norma nacional de Japón. La regla del registro naviero ruso (1961) también utiliza el supuesto de un ángulo inicial de balance a barlovento. El criterio meteorológico actual de IMO, que figura en el capítulo 2.3 de la parte A del Código de Estabilidad sin Averías, aplica el método de equilibrio de energías adoptado por Japón. Se asu-

me que un buque con un ángulo de escora constante debido a un viento de fuerza constante con oleaje de través experimenta un movimiento de balance resonante. Entonces, en el peor de los casos, al balancearse hacia barlovento, se da por supuesto que el buque está expuesto a vientos con ráfagas. En el caso del balance de resonancia, el momento de amortiguamiento de balance se cancela con el momento de excitación de la ola. En consecuencia, el equilibrio entre la energía de recuperación y la energía de la escora provocada por el viento puede validarse alrededor de la condición de buque totalmente adrizado. Por otra parte, como en la última fase de zozobra no existe ningún mecanismo de resonancia

cerca del ángulo de la estabilidad que se va perdiendo, podría considerarse que el efecto del momento de excitación de la ola es reducido.

En relación con el “*momento escorante provocado por el viento*”, tenemos que, en la norma japonesa, el momento de escora constante M_W se obtiene aplicando la fórmula siguiente:

$$M_W = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot A \cdot H_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right) \cdot V_W^2 \quad [64]$$

donde:

ρ	=	Densidad del aire.
C_D	=	Coefficiente de resistencia al avance.
A	=	Superficie lateral expuesta al viento por encima de la superficie del agua.
H	=	Brazo adrizante.
H_0	=	Distancia vertical desde el centro de la superficie lateral expuesta al viento hasta un punto situado a la mitad del calado medio del buque.
V_W	=	Velocidad del viento.

Los valores del coeficiente de resistencia al avance C_D , obtenidos mediante experimentos realizados con buques de pasaje y transbordadores de trenes, oscila entre 0,95 y 1,28. Por otra parte, mediante pruebas con túneles aerodinámicos para un buque de pasaje de cabotaje, se demostró que H/H_0 tiene un valor de alrededor de 1,2. Teniendo en cuenta estos datos, se dio por supuesto un valor medio de $C_D \cdot (H/H_0)$ de 1,22. Destacamos que IMO también ha adoptado estas fórmulas y coeficientes.

Para representar vientos variables, se deberá determinar la intensidad de las ráfagas. En la (fig.38) puede verse el coeficiente de ráfagas medido en varias condiciones tormentosas. Aquí el máximo es de 1,7 y la media es equivalente a $\sqrt{1,5} \approx 1,23$. Sin embargo, estos valores se midieron durante cerca de dos horas, mientras que la zozobra podía ocurrir dentro de la mitad del periodo natural de balance, es

decir de 3 a 8 segundos. Además, dado este lapso tan breve, la fuerza de reacción podría actuar en el centro de masa del buque. En consecuencia, en lugar de utilizarse el valor máximo, se adopta el valor medio de la (fig.37), lo que resulta en un coeficiente de brazo adrizante de 1,5 para las ráfagas, como se estipula en el Código de Estabilidad sin Averías de 2008.

En relación con el “*ángulo de balance en las olas (método japonés)*” los movimientos que pueden experimentar los buques suelen ser oscilaciones longitudinales, transversales, verticales, balance, cabeceo y guiñada. Sin embargo, con mar de través, los movimientos predominantes son las oscilaciones transversales, verticales y el balance. Por otra parte, las oscilaciones verticales tienen un efecto despreciable en el balance, y la combinación de las oscilaciones verticales y el balance puede ser anuladas por el momento de difracción de balance. Por ello, si se estima el momento de excitación de la ola sin tener en cuenta la difracción de las olas, el movimiento de balance puede representarse en un modelo independiente de otros tipos de movimiento. En consecuencia, si se tiene en cuenta el efecto amortiguador del balance no lineal, es posible obtener la amplitud del balance de resonancia de las olas de través regulares en grados aplicando la fórmula:

$$\varphi = \sqrt{\frac{\pi \cdot r \cdot \vartheta}{2N(\varphi N)}} \quad [65]$$

ϑ	=	Pendiente máxima de la ola en grados ($\vartheta = 180^\circ$)
-------------	---	--

s	=	Peralte de la ola.
r	=	Coefficiente de pendiente efectiva de la ola.
N	=	Coefficiente de amortiguación de balance de Bertin, que es una función de la amplitud del balance.

El peralte de la ola, basándose en observaciones realizadas en la mar, Sverdrup y Munk (1947) encontraron una relación entre la edad de la ola y su peralte. La edad se define como la relación existente entre la celeridad de la ola y la velocidad del viento. Para calcular el peralte de la ola, es necesario estimar el periodo natural de balance para un buque dado. En la norma japonesa, el valor medido en el buque se corrige con la fórmula empírica de Kato (1956). Sin embargo, en el Subcomité STAB se consideró que este procedimiento consumía demasiado tiempo y se pidió a Japón que elaborara una fórmula empírica simple y actualizada para el periodo de balance. Morita elaboró estadísticamente la fórmula actual, que se basa en datos medidos de 71 buques a escala normal en 1982.

El criterio meteorológico japonés introdujo supuestos probabilistas para determinar las ráfagas y el balance con olas irregulares, lo cual se traduce en un nivel final de seguridad probabilista poco claro. El posible error de estimación correspondiente al coeficiente del brazo escorante provocado por el viento, el coeficiente de amortiguación del balance, el coeficiente de la pendiente efectiva de la ola, el periodo natural de balance y el peralte de la ola añadieron incertidumbre al nivel necesario de seguridad. Por ello,

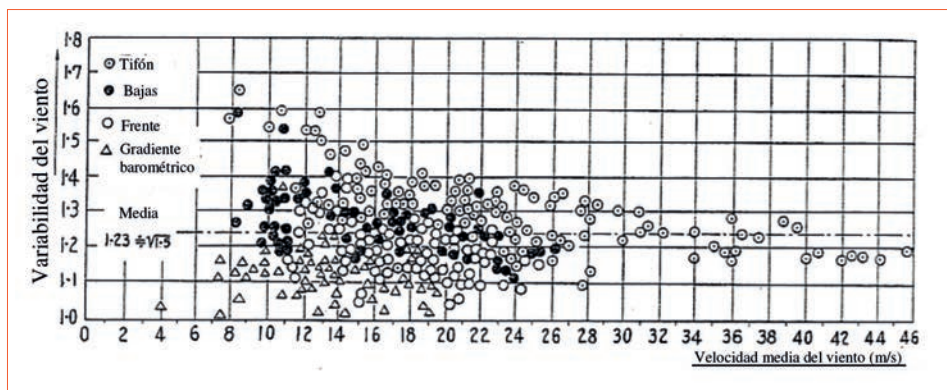


Fig. 38: Medición de la variabilidad del viento marino (Watanabe y otros, 1956).

Japón llevó a cabo cálculos de prueba correspondiente a 50 buques, de los cuales 13 eran buques de altura. Utilizando los resultados calculados, se determinó la velocidad del viento de fuerza constante para distinguir los buques que tienen una estabilidad inadecuada de otros buques. Como resultado, la velocidad del viento correspondiente a los buques de altura se determinó en 26 m/s; esta velocidad solamente se calculó a partir de estadísticas de siniestros correspondientes a buques y no se obtuvo directamente de las estadísticas reales del viento. La IMO también adoptó el valor crítico de velocidad del viento de 26 m/s. Si se sustituye $V_w = 26 \text{ m/s}$ en la ecuación (64), se obtiene la presión ejercida por el viento según el Código de Estabilidad sin Avería actual.

Criterio de viento y balance intensos o criterio meteorológico

El Código Internacional de Estabilidad sin averías, 2008 (Código IS 2008), adoptado el 4 de diciembre de 2008 mediante Resolución MSC 267(85), en su capítulo 2, punto 2.3 establece: Habrá que demostrar la aptitud del buque para resistir los efectos combinados del viento de través y del balance, del modo siguiente (fig.39):

- 1) Se someterá el buque a la presión de un viento constante que actúe perpendicularmente al plano de crujía, lo que dará como resultado el correspondiente brazo escorante, Be_{w1} .
- 2) Se supondrá que a partir del ángulo de equilibrio resultante θ_0 , el buque se balancea por la acción de las olas hasta alcanzar un ángulo de balance θ_1 a barlovento. El ángulo de escora provocado por un viento constante θ_0 no deberá ser superior a 16° o al 80% del ángulo de inmersión del borde de la cubierta, si este ángulo es menor.
- 3) A continuación, se someterá al buque a la presión de una ráfaga de viento que dará como resultado el correspondiente brazo escorante Be_{w2} .

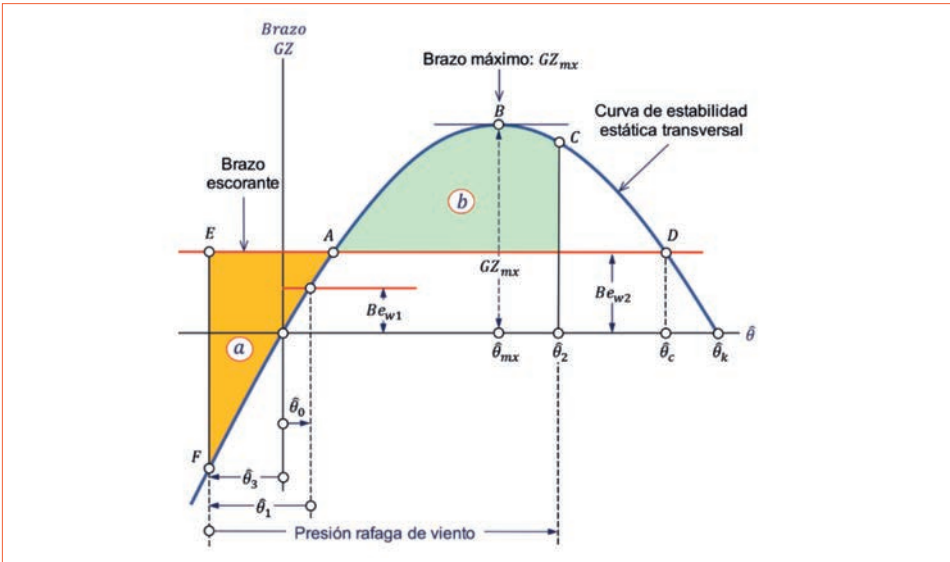


Fig. 39: Criterio meteorológico o de viento y balance intensos.

- 4) En estas circunstancias, el área b debe ser igual o superior al área a .

$$Be_{w1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot g \cdot \Delta} \quad \text{y}$$

$$Be_{w2} = 1,5 \cdot Be_{w1}$$

Los ángulos de la figura se definen del modo siguiente:

θ_0	=	Ángulo de escora provocado por un viento constante.
θ_1	=	Ángulo de balance a barlovento debido a la acción de las olas.
θ_2	=	Ángulo de inundación descendente θ_f , o 50° , o θ_c , tomando de estos valores el menor.
θ_f	=	Ángulo de escora al que se sumergen las aberturas del casco, superestructura o casetas que no puedan cerrarse de modo estanco a la intemperie. Al aplicar este criterio no hará falta considerar abiertas las pequeñas aberturas por las que no pueda producirse inundación progresiva. También se le denomina como "ángulo de inundación progresiva".
θ_c	=	Ángulo de la segunda intersección o ángulo límite de estabilidad, entre la curva de brazos escorantes Be_{w2} y la de brazos GZ .

Los brazos escorantes Be_{w1} y Be_{w2} provocados por el viento, a que se hace referencia en los puntos 1 y 3, son valores constantes a todos los ángulos de inclinación y se calcularán del modo siguiente:

donde:

P	=	Presión del viento de 504 N/m^2 . El valor de P utilizado para los buques en servicio restringido podrá reducirse a reserva de que lo apruebe la Administración.
A	=	Área lateral proyectada de la parte del buque y de la cubertada que quede por encima de la flotación en metros cuadrados.
Z	=	Distancia vertical desde el centro del área A hasta el centro del área lateral de la obra viva, o aproximadamente hasta el punto medio del calado medio en metros.
Δ	=	Desplazamiento del buque en toneladas métricas.
g	=	Aceleración debida a la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$.

Si la Administración los considere satisfactorios, podrán aceptarse otros medios para determinar el brazo escorante Be_{w1} como alternativa equivalente al cálculo que acabamos de exponer. Cuando se realicen dichas pruebas alternativas, se hará referencia a las Directrices elaboradas por la Organización (Directrices provisionales para la evaluación alternativa del criterio meteorológico - MSC.1/Circ.1200).

La velocidad del viento utilizada en las pruebas será igual a **26 m/s** en tamaño natural con un perfil de la velocidad uniforme. El valor de la velocidad del viento utilizado para los buques en servicios restringidos podrá reducirse a un valor que la Administración considere satisfactorio.

El ángulo de balance a barlovento debido a la acción de las olas $\hat{\theta}_1^{23}$, se calculará, en grados, del siguiente modo:

$$\hat{\theta}_1 = 109 \cdot k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot s} \quad [66]$$

Donde,

X_1	=	Factor de amortiguamiento en función de la relación manga y calado. Cuadro número 1.
X_2	=	Factor de amortiguamiento en función del coeficiente de bloque. Cuadro número 2.
k	=	Factor de amortiguamiento en función de la superficie de las quillas de balance y quilla de barra.
		- 1,0 respecto de un buque de pantoque redondo que no tenga quillas de balance ni de barra. - 0,7 respecto de un buque de pantoque quebrado. - El valor que se indica en el cuadro número 3 respecto de un buque con quillas de balance, de barra o ambas.
KG	=	Altura del centro de gravedad del buque con respecto a la quilla, corregida por el efecto de las superficies libres (metros).
r	=	$0,73 + \left(0,6 \cdot \frac{OG}{d}\right) \rightarrow OG = KG - d \rightarrow r = 0,73 + \left(0,6 \cdot \frac{KG - d}{d}\right)$
		Donde r es el coeficiente de pendiente efectiva de la ola. Además: $d = C_m$
s	=	Factor de peralte de la ola indicado en el cuadro número 4, donde T es el periodo natural de balance del buque. Si no se dispone de información suficiente, puede utilizarse la siguiente aproximación en segundos:
		$T = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{GM}} \rightarrow C = 0,373 + 0,023 \cdot \left(\frac{B}{d}\right) - 0,043 \cdot \left(\frac{E_F}{100}\right)$

Cuadro núm. 1	
Valores del factor X_1	
B/d	X_1
$\leq 2,4$	1,00
2,5	0,98
2,6	0,96
2,7	0,95
2,8	0,93
2,9	0,91
3,0	0,90
3,1	0,88
3,2	0,86
3,4	0,82
$\geq 3,5$	0,80

Cuadro núm. 2	
Valores del factor X_2	
C_B	X_2
$\leq 0,45$	0,75
0,44	0,82
0,55	0,89
0,60	0,95
0,65	0,97
$\geq 0,70$	1,00

Cuadro núm. 3	
Valores del factor k	
$\frac{A_k \cdot 100}{E_F \cdot B}$	k
0,0	1,00
1,0	0,98
1,5	0,95
2,0	0,88
2,5	0,79
3,0	0,74
3,5	0,72
$\geq 4,0$	0,70

Cuadro núm. 4	
Valores del factor S	
T	s
≤ 6	0,100
7	0,098
8	0,093
12	0,065
14	0,053
16	0,044
18	0,038
≥ 20	0,035

Nota: Los valores intermedios en los cuadros indicados se obtendrán por interpolación lineal

Los símbolos que aparecen en los cuadros que recogen los valores de los factores X_1 , X_2 , k , s , y en las fórmulas del período de balance tienen los siguientes significados.

E_F	=	Eslora en la flotación del buque en metros.
B	=	Manga de trazado del buque en metros.
d	=	Calado medio de trazado del buque en metros.
C_B	=	Coeficiente de bloque (-).
A_k	=	Área total de las quillas de balance o área de la proyección lateral de la quilla de barra, o suma de estas áreas en metros cuadrados.
GM	=	Altura metacéntrica corregida por el efecto de superficies libres en metros.

23.- En los buques dotados de dispositivos antibalance, el ángulo de balance se determinará sin tomar en consideración el funcionamiento de esos dispositivos. A menos que la Administración juzgue que se ha demostrado satisfactoriamente que los dispositivos son eficaces incluso con una interrupción repentina de la energía eléctrica que los alimenta.



*Pérdida de contenido en contenedores del buque “MSC Zone” sobre las islas Wadden del Mar del Norte debido al mal tiempo.
“Not much joy by the looks of it. Who wants that...? Ok, I take that doggie”*

Nota: la curva de brazos escorantes es una recta paralela al eje de abscisas, pues así lo exige el criterio meteorológico recogido en el Código IS 2008.

Los cuadros y fórmulas descritos se basan en datos de buques que presentan las siguientes características:

- B/d inferior a 3,5
- $(KG/d - l)$ entre -0,3 y 0,5
- T inferior a 20 segundos

En el caso de los buques cuyos parámetros rebasen los límites indicados arriba, el ángulo de balance θ_1 podrá determinarse también mediante experimentos con un modelo de buque de ese tipo utilizando el procedimiento descrito en la circular MSC.1/Circ.1200. Asimismo, la Administración podrá aceptar las estimaciones alternativas mencionadas para cualquier buque si lo estima oportuno.

GUÍA PARA EVITAR SITUACIONES PELIGROSAS EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y ESTADO DE LA MAR ADVERSOS

La orientación MSC.1/Circ.1228 de 11.01.2007, se elabora como una guía al capitán para evitar situaciones peligrosas en condiciones

meteorológicas y estados de la mar adversos, además de facilitarle una base para la toma de decisiones sobre el gobierno del buque en dichas condiciones, y ayudarle a sortear los fenómenos peligrosos que puedan encontrar en tales circunstancias.

Generalidades

Por “condiciones meteorológicas adversas” se entiende las olas causadas por el viento o la mar de fondo intensa. Algunas combinaciones de longitud y altura de ola en determinadas condiciones operacionales pueden dar lugar a situaciones peligrosas para los buques que cumplen los criterios especificados en el Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008.

Cuando se navega en condiciones meteorológicas adversas, es probable que el buque tenga que afrontar fenómenos peligrosos de diversa índole que pueden causar su zozobra o un balance intenso, con los consiguientes daños a la carga, al equipo y a las personas que se encuentren a bordo. La vulnerabilidad de un buque ante fenómenos peligrosos dependerá de los parámetros reales de estabilidad, la configuración del casco, el tamaño del buque y su velocidad. Esto implica que la vulnerabilidad del buque a los efectos peligrosos, incluida la zozobra, y la probabilidad de que éstos se produzcan con

un estado del mar determinado pueden variar de un buque a otro.

Las olas deberán observarse de forma periódica. En particular, el periodo de la ola T_w se medirá con un cronómetro como el intervalo de tiempo comprendido entre la generación de espuma por una rompiente y su reaparición después de pasar por el seno de la ola. La longitud de la ola, λ_e , se determina por observación visual con referencia a la eslora del buque, o bien mediante la lectura de la distancia media entre las crestas de ola sucesivas en las imágenes de olas producidas por el radar²⁴.

El periodo y la longitud de la ola están relacionados como se indica a continuación:

$$\lambda_e = 1,56 \cdot T_w^2 \quad (\text{mts}) \quad T_w = 0,8\sqrt{\lambda} \quad (\text{seg})$$

El periodo de confluencia o de encuentro, T_e , puede medirse con un cronómetro como el periodo de cabeceo o calcularse a partir de la fórmula siguiente:

$$T_e = \frac{3 \cdot T_w^2}{3 \cdot T_w + V_m \cdot \cos \alpha} \quad (\text{seg}) \quad [67]$$

donde V_m , representa la velocidad del buque en nudos; y α , es el ángulo que forman las direcciones de la quilla y de la ola (mar de proa significa que $\alpha = 00^\circ$).

24.- En los buques que lleven un computador a bordo para las evaluaciones de estabilidad y que utilicen un soporte lógico especialmente elaborado que tenga en cuenta las principales características, la estabilidad real y las características dinámicas del buque particular en las condiciones de viaje reales, dicho soporte lógico deberá ser aprobado por la Administración. Los resultados derivados de estos cálculos sólo deberán considerarse como un instrumento de apoyo durante el proceso de toma de decisiones.

El diagrama de la (fig. 40) puede utilizarse para determinar el periodo de confluencia. También deberá calcularse la altura de las olas significativas.

Precauciones

La Orientación puede ser demasiado restrictiva para determinados buques cuyas propiedades dinámicas son más favorables, o demasiado flexible para otros buques. Un buque también puede ser inseguro, aunque no se encuentre en las zonas peligrosas que aquí se definen, si su estabilidad es insuficiente.

La presente Orientación se limita a los peligros en condiciones meteorológicas adversas que pueden causar la zozobra del buque o un balance intenso con riesgo de daño. No se abordan otros peligros y riesgos en condiciones meteorológicas adversas, tales como daños a consecuencia de los golpes de las olas, los esfuerzos longitudinales o torsionales, los efectos especiales de las olas en corrientes o aguas poco profundas, o los riesgos de abordaje o varada, que también deberán tenerse en cuenta al decidir el rumbo y velocidad apropiados en condiciones meteorológicas adversas.

El capitán deberá asegurarse de que su buque cumple los criterios de estabilidad especificados en el Código de Estabilidad sin Averías de la IMO o en un código equivalente. Deberán adoptarse medidas adecuadas para garantizar la integridad de estanqueidad del buque, y se verificará regularmente la sujeción de la carga y del equipo. El periodo de balance natural del buque, T_b , se determinará observando los movimientos de balance con mar llana o calma.

Fenómenos peligrosos

- Fenómenos que suelen ocurrir con mar de popa y mar de aleta. Un buque que navega con mar de popa o mar de aleta encuentra olas cuyo periodo es más largo que el de las olas de través, de proa o de amura, siendo los peligros principales que causa esta situación los siguientes:
 - Navegación sobre la cresta de

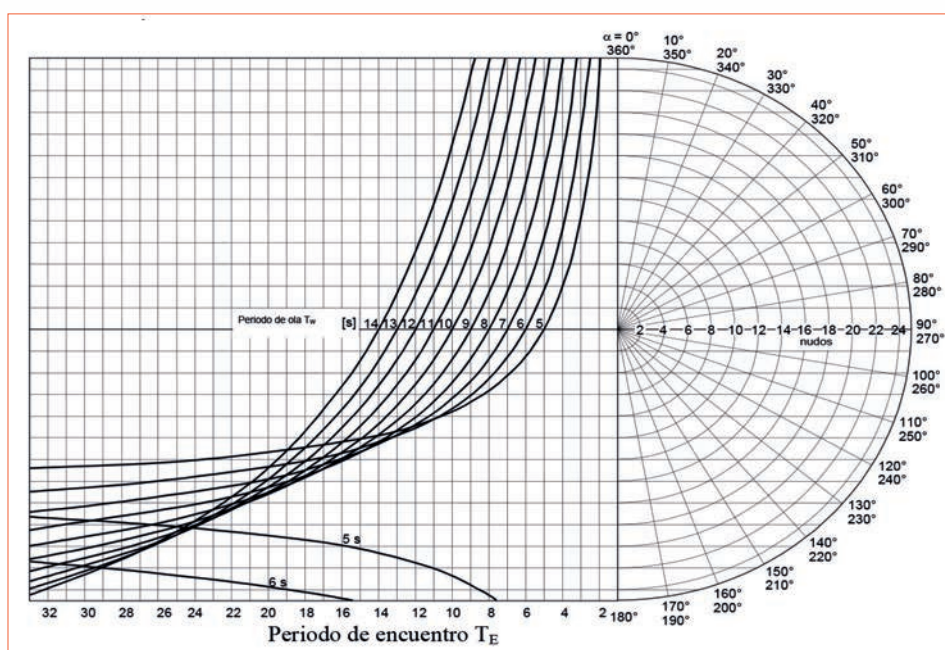


Fig. 40: Determinación del periodo de confluencia.

las olas y caída al través. Cuando el buque se encuentra en la cara frontal de una ola de gran pendiente con mar de popa o de aleta, se puede acelerar para remontar la ola; esto se llama navegar sobre la cresta de las olas. En dicha situación, puede presentarse el fenómeno denominado de “caída al través”, que pone al buque en peligro de zozobra como resultado de un cambio repentino del rumbo del buque y de una gran escora imprevista.

- Disminución de la estabilidad sin avería cuando la parte central del buque se encuentra sobre la cresta de la ola. Cuando un buque navega sobre la cresta de una ola, la estabilidad sin avería puede disminuir de forma sustancial según los cambios de forma del casco sumergido. La disminución de estabilidad puede resultar crítica para longitudes de ola comprendidas entre $0,6 \cdot E_{pp}$ y $2,3 \cdot E_{pp}$, donde E_{pp} es la eslora entre perpendiculares del buque en metros. En este intervalo, la disminución de la estabilidad es prácticamente proporcional a la altura de la ola. Esta situación resulta especialmente peligrosa con mar de popa o de aleta, puesto que se prolonga el tiempo de navegación sobre la cresta de

la ola, es decir, el periodo con menor estabilidad.

- Movimiento de balance sincrónico. Si el periodo de balance natural de un buque coincide con el periodo de confluencia con la ola, pueden producirse grandes movimientos de balance. Navegando con mar de popa o de aleta esta situación puede tener lugar cuando la estabilidad transversal del buque es marginal y, por lo tanto, se prolonga el periodo de balance natural.
- Movimiento de balance paramétrico. Los movimientos de balance paramétrico de amplitudes grandes y peligrosas con olas se originan como consecuencia de las variaciones de estabilidad entre las posiciones correspondientes a la cresta y al seno de la ola. El balance paramétrico puede producirse en dos situaciones distintas:
 - La estabilidad varía con un periodo de confluencia que es aproximadamente igual al periodo de balance natural del buque (relación de confluencia 1:1). La estabilidad registra un valor mínimo una vez durante cada periodo de balance. Esta situación se caracteriza por el balance asimétrico, es decir, por el hecho de que la amplitud con el centro del buque

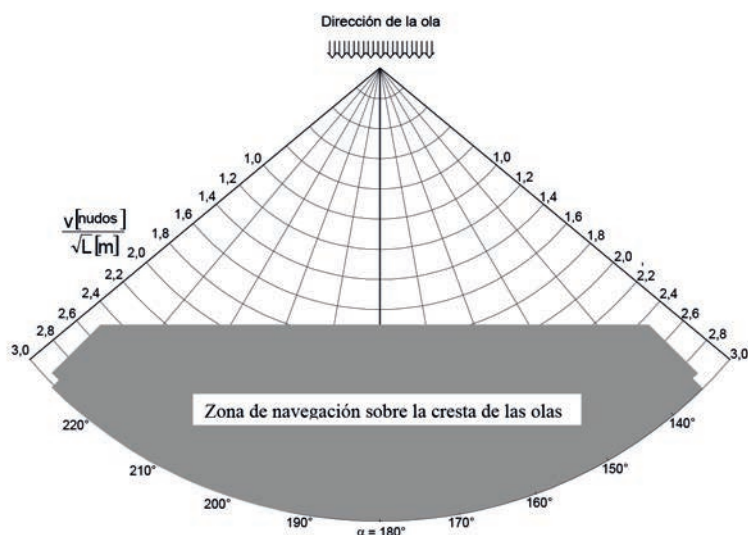


Fig. 41: Riesgo de navegación sobre la cresta de las olas con mar de popa o de aleta.

en la cresta de la ola sea mucho mayor que la amplitud en el otro lado. Dada la tendencia al retraso del adrizado desde la amplitud grande, el periodo de balance T_r podrá adaptarse al periodo de confluencia hasta un cierto punto, de modo que este tipo de balance paramétrico pueda producirse para un rango amplio de periodos de confluencia. La transición a la resonancia armónica puede resultar perceptible con mar de aleta.

- La estabilidad varía con un periodo de confluencia que es aproximadamente igual a la mitad del periodo de balance natural del buque (relación de confluencia 1:0,5). La estabilidad registra un valor mínimo dos veces en cada periodo de balance. Con mar de popa o de aleta, en los que el periodo de confluencia es más largo que el periodo de la ola, esto sólo puede ocurrir con periodos de balance natural muy grandes, lo cual indica una estabilidad sin avería marginal. El resultado es un balance simétrico de gran amplitud y vuelve a observarse la tendencia del buque a adaptar su respuesta al periodo de confluencia, debido a la reducción de la estabilidad en la cresta de la ola. El balance paramétrico caracterizado por la relación de con-

fluencia 1:0,5 también puede producirse con mar de proa o con mar de amura.

A diferencia de lo que sucede con mar de popa o mar de aleta, en los que la variación de la estabilidad sólo se ve afectada por el paso de las olas a lo largo del buque, la oscilación vertical y el cabeceo intenso que suelen registrarse con mar de proa o de amura pueden contribuir a la variación de la estabilidad, en particular como consecuencia de la inmersión y emersión periódicas de los marcos del codaste y del abanico de los buques modernos. Esto puede traducirse en movimientos acusados de balance paramétrico incluso con variaciones de estabilidad inducidas por olas más pequeñas.

El periodo de cabeceo y oscilación vertical del buque suele ser igual al periodo de confluencia con las olas. La incidencia del movimiento de cabeceo sobre el movimiento de balance paramétrico depende de la coordinación existente entre ellos.

- Combinación de diversos fenómenos peligrosos. El comportamiento dinámico de un buque que navega con mar de popa o de aleta es muy complejo. El movimiento del buque es tridimensional y, en combinación con los fenómenos antedichos, pueden registrarse simultánea o secuencialmente varios factores perjudiciales o fenómenos peligrosos,

tales como momentos escorantes adicionales originados a consecuencia de que el borde de la cubierta esté sumergido, del agua transportada y retenida en cubierta o del corrimiento de la carga debido a movimientos de balance amplios. Esto puede dar lugar a combinaciones extremadamente peligrosas que pueden causar la zozobra del buque.

Orientación sobre las operaciones

Se recomienda al capitán que, cuando navegue con mal tiempo, siga los procedimientos para el gobierno del buque que se indican a continuación, a fin de evitar las situaciones peligrosas.

- Condición del buque. La presente orientación se aplica a todos los tipos de buques tradicionales que naveguen con mar gruesa, siempre que satisfagan los criterios sobre estabilidad especificados en la resolución MSC.267(85), adopción del Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008.
- Como evitar las condiciones peligrosas. La navegación sobre la cresta de la ola y la caída al través pueden producirse cuando el ángulo de confluencia se encuentra en la gama de $135^\circ < \alpha < 225^\circ$ y la velocidad es superior a:

$$\frac{1,8 \cdot \sqrt{E_{pp}}}{\cos(180 - \alpha)} \quad (\text{nudos}) \quad [68]$$

Para evitar la navegación sobre la cresta de la ola y una posible caída al través, la velocidad o el rumbo, o ambos, deben quedar fuera de la zona peligrosa indicada en la (fig. 41).

- Embestidas sucesivas de olas altas. Cuando la longitud media de la ola es superior a $0,8 \cdot E_{pp}$ y la altura significativa de la ola es superior a $0,04 \cdot E_{pp}$, y si además hay indicios claros de comportamiento peligroso del buque, el capitán debe cuidarse de no entrar en la zona peligrosa, según se indica en la (fig. 42). Cuando el buque se encuentra en dicha

zona se deberá proceder a una reducción de la velocidad o a un cambio de rumbo para impedir la embestida sucesiva de olas altas, pues podría suponer un peligro debido a la reducción de la estabilidad sin avería, los movimientos de balance sincrónico, los movimientos de balance paramétrico o la combinación de diversos fenómenos.

La zona peligrosa de la (fig.42) corresponde a condiciones en las cuales el periodo de confluencia con la ola (T_e) es casi el doble (es decir, alrededor de 1,8 - 3,0 veces) que el periodo de la ola (T_w), de acuerdo con la (fig. 40).

- **Movimiento de balance sincrónico y paramétrico.** El capitán debe evitar el movimiento de balance sincrónico, que se produce cuando el periodo de confluencia con la ola, T_e , es casi igual al periodo de balance natural del buque, T_r .

A fin de evitar el balance paramétrico con mares de popa, de aleta, de proa, de amura o de través, deberá seleccionarse el rumbo y la velocidad del buque de manera que se eviten unas condiciones en las que el periodo de confluencia sea casi igual que el periodo de balance del buque ($T_e \approx T_r$) o que la mitad de este mismo periodo ($T_e \approx 0,5 \cdot T_r$).

El periodo de confluencia T_e puede determinarse a partir de la (fig. 40) introduciendo la velocidad del buque en nudos, el ángulo de confluencia α y el periodo de la ola T_w .

FENÓMENOS DINÁMICOS DE ESTABILIDAD DE LOS BUQUES ENTRE OLAS GRANDES

Como ya se ha comentado, gran parte de la vida operativa del buque se da en presencia de mares donde ocasionalmente podemos encontrar condiciones bastante duras. En circunstancias extremas, el buque deberá soportar condiciones dinámicas ambientales adversas que pueden hacer que sufra aceleraciones, flexiones, y torsiones, sin producirse fallo estructural alguno,

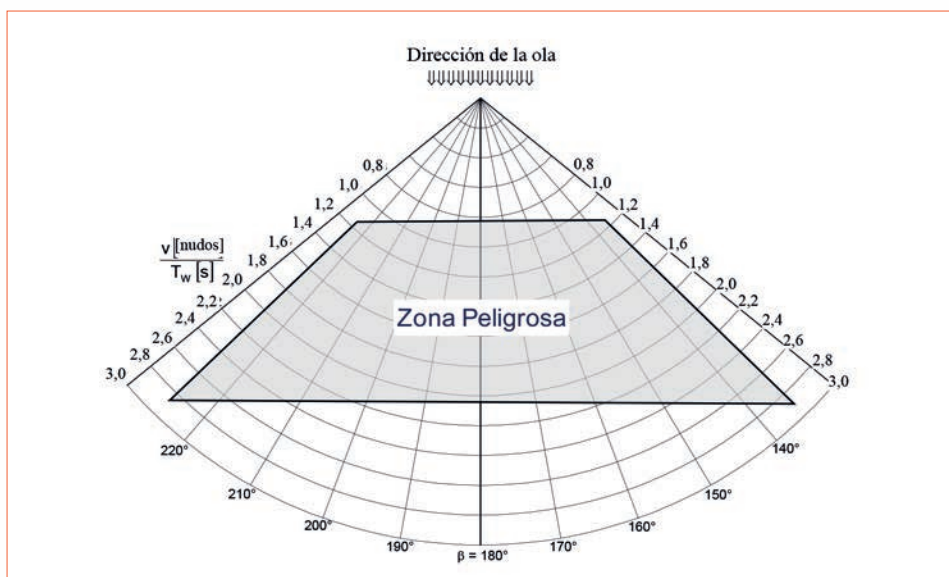


Fig. 42: Riesgo de embestida sucesiva de olas altas con mar de popa o mar de aleta.

y ante olas que lo puedan sobrepasar, deberá ser capaz de navegar sin zozobrar.

Podemos pensar que gobernar un buque cuando se navega con la mar y el viento de proa es más complejo y desafiante que con otros ángulos de incidencia. Sin embargo, desde el punto de vista operacional, los capitanes lo consideran más sencillo. Por el contrario, cuando el buque está afectado por otros ángulos de incidencia, es necesario un gobierno más prudente y conservador por encontrar posiciones donde el buque será ingobernable.

Cuando un buque navega con su popa afectada por golpes de mar continuos y severos, originados por grandes olas y su velocidad de máquinas coincide con la velocidad de un grupo de estas olas, o cuando la velocidad de las olas es

mayor que la del buque, su gobierno se hace incontrolable pudiendo causar daños en sus finos y en su aparato de gobierno.

En función de una serie de resultados experimentales, las condiciones bajo las cuales el buque podría quedar atrapado en un peligroso fenómeno de agrupación de olas de encuentro se representan en la (fig.43). La condición probable que se pueda dar por confluencia peligrosa de un grupo de olas se obtiene mediante el cociente entre la velocidad del buque en nudos y el periodo de la ola en segundos, si el valor es igual a 1,5 pueden presentarse situaciones comprometidas.

Según lo establecido en el punto 4.2 de la resolución MSC.1/Circ.1228 (11-enero-07), en el diagrama sobre el riesgo de embestida sucesiva de olas altas con mar de popa o mar de

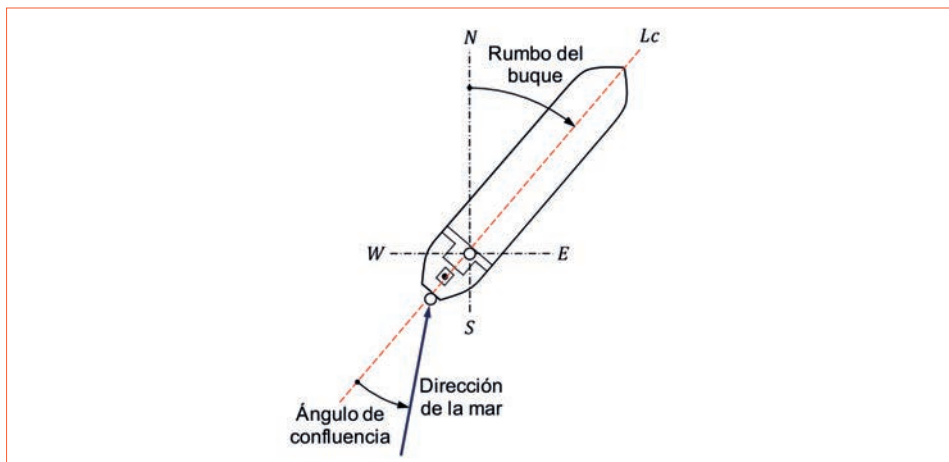


Fig. 43: Ángulo de confluencia.

aleta, se representa un área sombreada que define la zona peligrosa dentro del rango mostrado por el diagrama²⁵. En dicha figura también pueden observarse las relaciones entre la longitud de onda y el periodo de las olas T_w , así como, el periodo de confluencia o encuentro T_e .

También, la resolución de referencia nos ayuda a evaluar si nuestro buque está siendo afectado de forma sucesivas por olas altas, para ello aplicamos:

- La longitud media de la ola, L_{m-ola} , es superior a $0,8 \cdot E_{pp}$.
- La longitud media de la ola es superior a $0,6 \cdot E_{pp}$ (aplicable solo a buques rolones).
- La altura significativa de la ola, A_{s-ola} , es superior a $0,04 \cdot E_{pp}$.

Veamos un ejemplo: sea un buque con una eslora entre perpendiculares de 120 m , a bordo se mide una longitud de ola de 126 m y una altura significativa de ola de 5 m . Para saber si navegamos afectados por olas altas de forma sucesiva, aplicamos:

$$L_{m-ola} = 0,8 \cdot E_{pp} = 0,8 \cdot 120 = 96 \text{ m} \leq 126 \text{ m}$$

$$A_{s-ola} = 0,04 \cdot E_{pp} = 0,04 \cdot 120 = 4,80 \text{ m} \leq 5 \text{ m}$$

Los datos obtenidos implican que, para un instante cualquiera existe la posibilidad del embarque de agua por la proa y/o dar balances importantes.

En las expresiones anteriores hemos aplicado los valores reales de la longitud y altura de la ola; sin embargo, como el buque cuenta con velocidad avante, el periodo y la longitud reales de la ola serán diferentes de los experimentados por el movimiento de balance del buque. Debido a ello, se nos plantea como determinar el periodo actual de la ola y su longitud cuando se aprecia a bordo un periodo de ola determinado.

Si en un instante cualquiera, nuestro buque navega a 20 m/h con un ángulo de encuentro con las olas de 30° , siendo la sensación del periodo

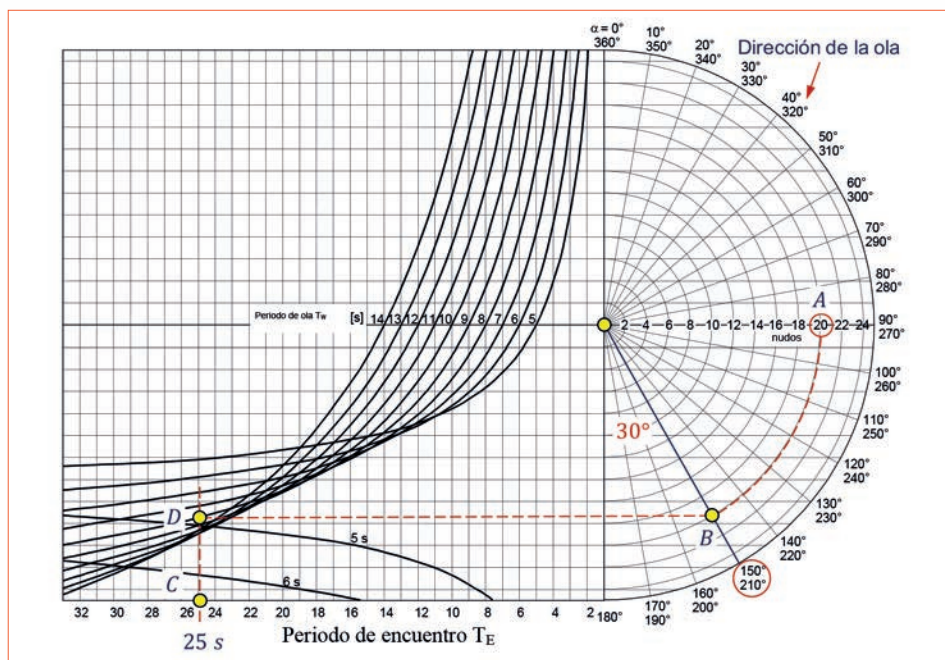


Fig. 44: Determinación del periodo de la ola.

de encuentro de 25 seg , el periodo real de las olas lo podemos determinar por el siguiente procedimiento (fig.44):

1. En la semi-rosa náutica de la derecha del gráfico de referencia, y en concreto sobre su eje horizontal, localizamos la velocidad de máquinas del buque 20 m/h , punto A.
2. Tomando como origen el ángulo de 180° situamos el punto donde el ángulo de 30° representa las olas que interceptan la popa de buque (el ángulo de encuentro del buque con las olas es de 150°).
3. Desde el punto A, se prolonga la velocidad de máquinas hasta cortar la recta del ángulo de encuentro, punto B.
4. En la escala del periodo de encuentro, localizamos su valor (25 seg punto C), seguidamente, trazamos la recta perpendicular al eje de la escala del periodo de encuentro.
5. Partiendo de B, se traza una paralela al eje del periodo de encuentro, hasta cortar a la perpendicular del periodo de encuentro (punto D).

6. El corte de las dos rectas anteriores en el punto D, coincide con la línea curvada que nos indica el valor buscado del periodo de la ola (9 seg).

Como el periodo real de la ola es 9 seg , los valores aproximados de longitud de ola en metros se pueden calcular aplicando la fórmula siguiente,

$$L_R = 1,56 \cdot (T_e)^2 \quad [69]$$

En nuestro caso, la longitud de la ola será: $L_R = 1,56 \cdot 9^2 = 1,56 \cdot 81 = 126,36 \text{ m}$.

El capitán determinará si su buque se encuentra dentro de la zona peligrosa o no, utilizando el periodo actual de ola y la velocidad del buque en el diagrama V_m/T_w recogido en la orientación MSC.1/Circ.1228. Veamos un par de ejemplos (fig.45):

- Punto A₁. El buque navega a 10 m/h , siendo la dirección de las olas 150° y el periodo medio de la ola $T_w = 9 \text{ seg}$.

$$\frac{V_m}{T_w} = \frac{10}{9} = 1,11$$

Punto situado fuera de la zona identificada como peligrosa.

²⁵- El periodo de ola se mide con un cronometro como el intervalo de tiempo en segundos entre el paso de dos crestas, o dos senos, sucesivos por un mismo punto. También se puede definir como el tiempo empleado por una cresta, o por un seno, en recorrer una distancia igual a la longitud de la ola. La longitud de la ola se determina por la observación visual con referencia a la eslora del buque.

- Punto A_2 . Buque navegando a 20 m/h, siendo la dirección de las olas 150° y el periodo medio de la ola $T_w = 9$ seg.

$$\frac{V_m}{T_w} = \frac{20}{9} = 2,22$$

Punto situado dentro de la zona identificada como peligrosa.

Importante: Si un buque termina dentro de la zona peligrosa, como resultado del fenómeno de agrupación de olas de encuentro, para salir de la zona peligrosa necesitamos navegar combinando una reducción de velocidad con un cambio de rumbo.

- **Fenómenos del Balance Paramétrico.** En los últimos años, este fenómeno se ha convertido en un tema de actualidad debido al incremento de accidentes asociados al mismo, y al interés de la IMO por su importancia dentro de la seguridad del buque, de la tripulación y de su carga. Por

esa razón, su estudio ha despertado el interés de universidades, administraciones y sociedades de clasificación.

La “*resonancia paramétrica*” es una inestabilidad dinámica del balance del buque, originada por

la variación de las fuerzas restauradoras transversales con el paso de la ola y al efecto de los movimientos de arfada o cabeceo, bajo unas determinadas condiciones de navegación. Cuando se produce, la amplitud del balance puede incrementarse hasta alcanzar

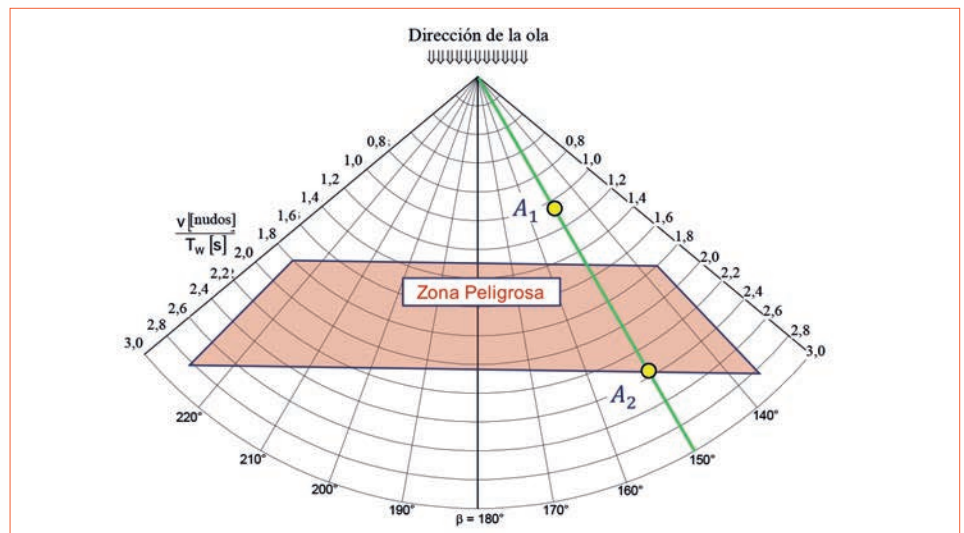
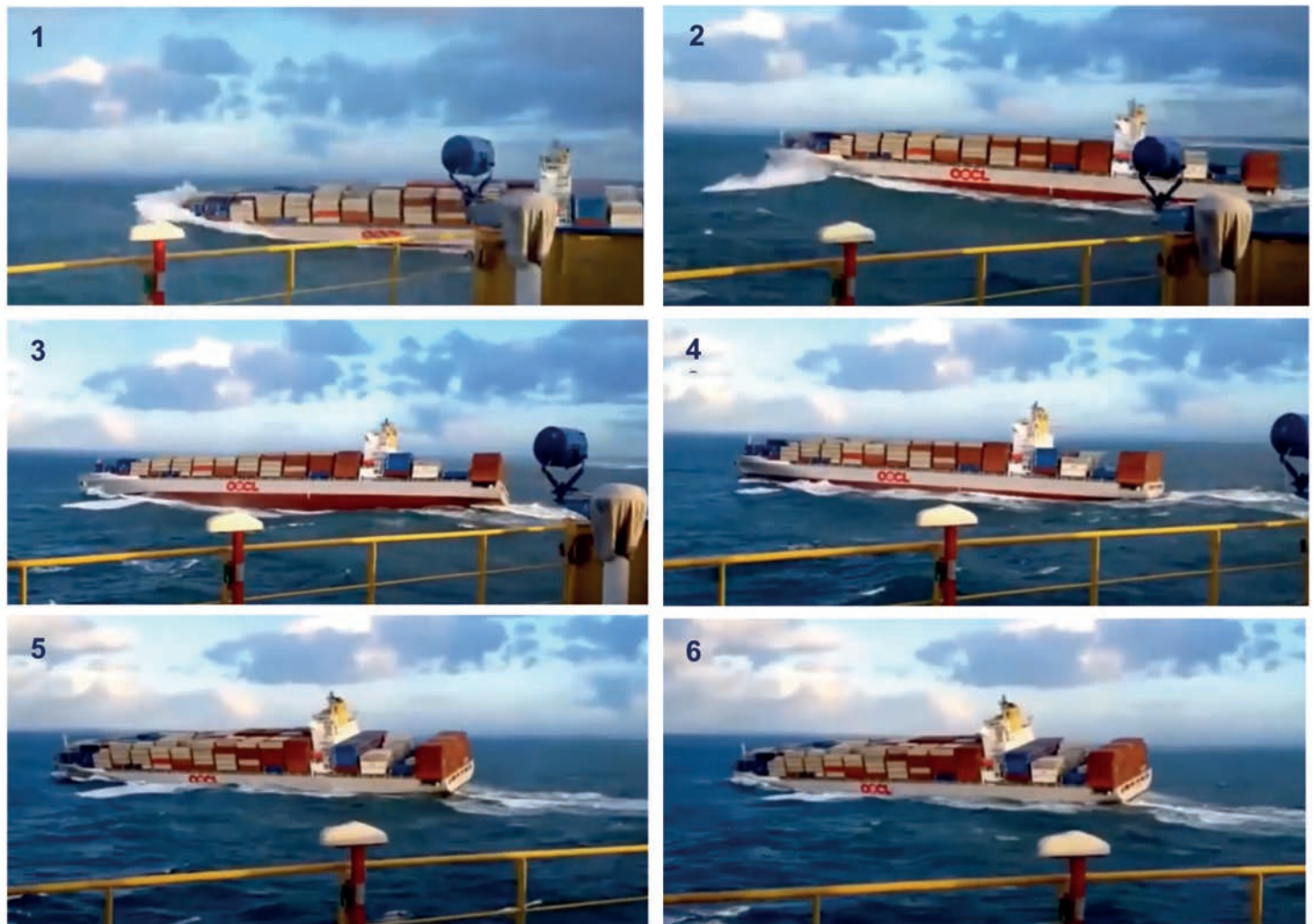


Fig. 45: Diagrama V_m/T_w según IMO MSC.1/Circ.1228



Balance Paramétrico - <https://www.youtube.com/watch?v=FvUmrTQvTJQ>

escoras importantes. Los buques más afectados por este efecto son los buques containeros, rolones, cruceros y pesqueros.

La necesidad de conocer el fenómeno en profundidad y de diseñar sistemas que detecten su aparición con anterioridad suficiente a su desarrollo, permitiéndole a las tripulaciones de los buques tomar las medidas correctivas necesarias o alertar al pasaje, es una de las actuales reivindicaciones de la industria marítima en los sectores afectados.

Cuando el buque navega a través de olas longitudinales regulares, el buque se balancea repentinamente, p.e. hacia estribor en la primera cresta y hacia babor en el siguiente seno. Sin embargo, cuando se produce un balance paramétrico, un buque se escora hacia la banda de estribor en la primera cresta y hacia el de babor en la cresta siguiente, lo que significa que se completa un ciclo de resonancia por cada dos ciclos de olas. En consecuencia, la amplitud del balance del buque se magnifica gradualmente. El buque se escora solo una vez por cada dos ciclos de olas que pasan. Este tipo de balance se magnifica cuando el periodo de ola de encuentro alcanza la mitad del periodo de balance natural del buque. La secuencia que se produce en este sentido es aproximadamente la siguiente:

La estabilidad del buque con la cresta de la ola próxima a la cuaderna maestra se reduce mucho adquiriendo el buque un gran ángulo de escora. Esta reducción se produce cuando la velocidad del buque coincide con la velocidad de la ola. Cuando la cresta permanece debajo del metacentro transversal, el riesgo puede verse aumentado. La ola continuará pasando por el buque y su seno llegará a la cuaderna maestra mientras que el buque se escora, lo que resulta en un incremento acentuado de la estabilidad.

Como resultado, el buque tiende a retornar bruscamente a su

posición de adrizado y cuando la alcanza, adquirirá una velocidad angular de balance importante. Mientras tanto, otra cresta de ola llegará a la cuaderna maestra, reduciendo su estabilidad durante el balance de su posición adrizada para la otra banda. Así, el buque se escorará aún más hacia esta banda debido a la disminución del momento adrizante o restaurador. Si ahora, otro seno de la ola se aproxima a la cuaderna maestra con la correcta sintonía, el balance hacia esta banda se detendrá, y el buque tenderá a adrizarse nuevamente. Si este proceso continúa, el buque rápidamente alcanzará un punto de zozobra.

Cuanto más rápido navega un buque en esas condiciones de mar, mayor es el riesgo de zozobrar debido a la reducción de estabilidad, por el contrario, el riesgo disminuye al reducir la velocidad para que la cresta de la ola no permanezca debajo del metacentro.

- **Fenómeno de Surf-riding & Broaching.** A menudo resulta que el buque se aparta de su derrota cuando se incrementa su velocidad de máquinas debido a la

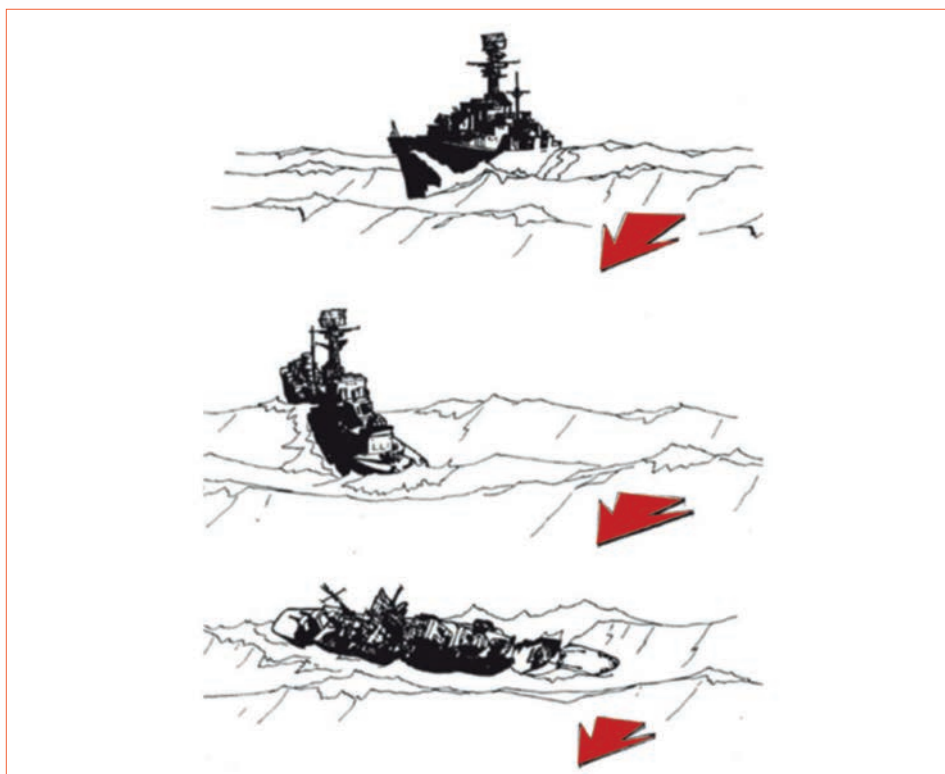
acción de una ola alta seguida por el efecto Surf-Riding & Broaching.

Se trata de un fenómeno extremadamente peligroso que es responsable de pérdidas de control que ponen en riesgo la seguridad del buque, esta acción puede producir la voltereta instantánea del buque.

Para evitar el efecto Surf-Riding & Broaching, se debe conocer la velocidad crítica de máquinas que lo causa, sabiendo que dicha velocidad varía en función de la longitud de onda y la altura de la ola.

En la (fig.46), tenemos que el área de color anaranjado representa la zona crítica “*Surf-Riding Dangerous Zone*” recogida en la orientación MSC.1/Circ.1228; el punto 4.2.1 “*Navegación sobre la cresta de la ola y la caída al través*” establece que pueden producirse cuando el ángulo de confluencia $\hat{\alpha}$ se encuentre en la gama siguiente $135^\circ < \hat{\alpha} < 225^\circ$ y la velocidad crítica sea superior a:

$$V_{zc} = \frac{1,8 \cdot \sqrt{E_{pp}}}{\cos(180 - \hat{\alpha})} \quad [70]$$



Surf-riding and Broaching. Journal of Mechanical Engineering Science. (J.E. Conolly)

Para que este fenómeno no se produzca, la velocidad del buque debe reducirse a menos de: $1,8 \cdot \sqrt{E_{pp}}$.

Como complemento a lo indicado, en la figura de referencia se añade el área de color amarillo que representa la zona peligrosa “Surf-Riding Broaching Marginal Zone” que pertenece a la orientación MSC.1/Cir.707 (19-10-95).

$$V_{zp} = \frac{1,4 \cdot \sqrt{E_{pp}}}{\cos(180 - \hat{\alpha})} \quad [71]$$

Para que este fenómeno no se origine, la velocidad debe reducirse a menos de: $1,8 \cdot \sqrt{E_{pp}}$. Destacamos que el cambio de velocidad corre el riesgo de provocar Broaching-to, aunque no se llegue a la zona peligrosa.

En la tabla adjunta se presentan las velocidades críticas y peligrosas a las que ocurrirán estos fenómenos. Al hablar de “velocidad óptima”, se debe tener presente la velocidad adicional debida a la aceleración adquirida en la pendiente descendente de la ola. Incluso para buques cuya eslora entre perpendiculares sea superior a **200 metros**, es importante ser conscientes de este fenómeno que puede estar comúnmente asociado a buques de alta velocidad.

Cuando un buque navega en aguas poco profundas, este fenómeno puede producirse incluso cuando el buque navega a una velocidad de máquinas comparativamente baja. Esto se debe a que la propagación de las olas se disuade en aguas poco profundas, por lo que el punto crítico puede ser comparativamente alcanzable incluso cuando el buque navega a estas velocidades.

Conclusión. En el caso de buques con carga a granel (bulkcarriers) o carga líquida (petroleros), no existe una diferencia significativa entre la altura metacéntrica real y la calculada mediante un software de cálculo de carga a bordo. Sin

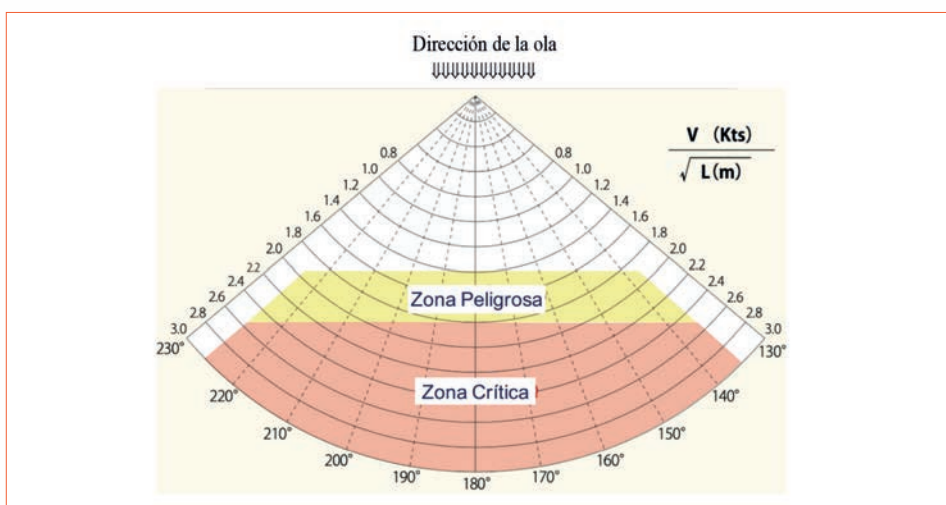


Fig. 46: Surf-Riding (Broaching-to) Marginal Zone Speed.

Velocidad en la Zona Crítica								
<i>Epp</i> (metros)	10	20	50	70	100	150	200	300
$1,8 \cdot \sqrt{E_{pp}}$ (nudos)	6	8	13	15	18	22	25	31
Velocidad en la Zona Peligrosa								
$1,4 \cdot \sqrt{E_{pp}}$ (nudos)	4	6	10	12	14	17	20	24

embargo, el en el caso de buques portacontenedores, donde el peso real de cada contenedor cargado es diferente al peso declarado, existirá una diferencia importante entre la altura metacéntrica real y la calculada utilizando la información proporcionada por la terminal.

Al dar comienzo el viaje de un buque portacontenedores, cada oficial de guardia calculará el periodo de balance natural del buque y el capitán verificará la altura me-

tacéntrica real corregida por superficies libres. Seguidamente se irá comparando y analizando los resultados obtenidos con la información facilitada en los libros de estabilidad y trimado del astillero constructor del buque. El procedimiento indicado se lleva a cabo calculando la altura metacéntrica transversal del buque mediante la fórmula adjunta a continuación, y operando con ella, deducimos la expresión que nos facilita el periodo de balance en segundos.

$$GM = \frac{4\pi^2 \cdot K_2}{g \cdot T^2} = \frac{4 \cdot 3,14159^2 \cdot (0,4 \cdot M)^2}{9,8 \cdot T^2} = \frac{4 \cdot 9,86959 \cdot 0,14 \cdot M^2}{9,8 \cdot T^2} = \frac{6,31654 \cdot M^2}{9,8 \cdot T^2} = 0,64454 \cdot \frac{M^2}{T^2}$$

$$T^2 \cdot GM = 0,64454 \cdot M^2 \rightarrow T^2 = \frac{0,64454 \cdot M^2}{GM} \rightarrow \sqrt{T^2} = \frac{\sqrt{0,64454 \cdot M^2}}{\sqrt{GM}}$$

$$T = \frac{0,80283 \cdot M}{\sqrt{GM}} \quad [72]$$

Donde:

<i>T</i>	=	Periodo de balance en segundos.
<i>K</i>	=	Radio de giro del buque, para buques grandes será igual a $0,4 \cdot M$ en metros.
<i>M</i>	=	Manga del buque.
<i>g</i>	=	Aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/seg}^2$)



www.fondear.org/infonautic/Barco/Diseno_Construccion/Proa-Invertida

CONDICIÓN DE BUQUE MUERTO

La condición de **“buque muerto”** a efectos de la Regla II-1/3-8 y II-1/26.4 del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar de 1974, adoptadas en Londres el 25 de noviembre de 2016 mediante la Resolución MSC. 409(97), Convenio SOLAS edición refundida de 2020, será entendida como una condición bajo la cual el motor principal, las calderas y los motores auxiliares no están en funcionamiento debido a la ausencia de energía y en el restablecimiento de la propulsión, no se supone que se disponga de energía almacenada para el arranque y funcionamiento de la instalación de propulsión, la fuente principal de energía eléctrica y otros auxiliares esenciales.

La IMO consideró que la condición de **“buque muerto”** es uno de los principales escenarios de pérdida de estabilidad en la mar. Se supone que es especialmente peligroso para los buques con grandes áreas laterales por encima de la línea de flotación, por ejemplo, con grandes superestructuras como los Ro-Pax, o grandes buques portacontenedores o containereros.

El Criterio Meteorológico que fue adoptado por la IMO en 1985 a tra-

vés de la Resolución A.562(14), fue el primer criterio severo de viento y balance basado en la física relacionada con la condición de **“buque muerto”** como un modo de fallo de estabilidad importantísimo. El actual Código de Estabilidad Intacta, así como su predecesor, IMO Resolución A749(18), contiene el **“Severe wind and rolling criterion – Weather criterion”**.

Otro aspecto a tener presente que además juega un papel muy importante en la dinámica del buque en condiciones de **“buque muerto”**, son las fuerzas relacionadas con la entrada de la cubierta del buque en la mar. Una revisión exhaustiva de este tema se debe tener muy presente a la hora de esta situación crítica.

Resulta muy importante saber

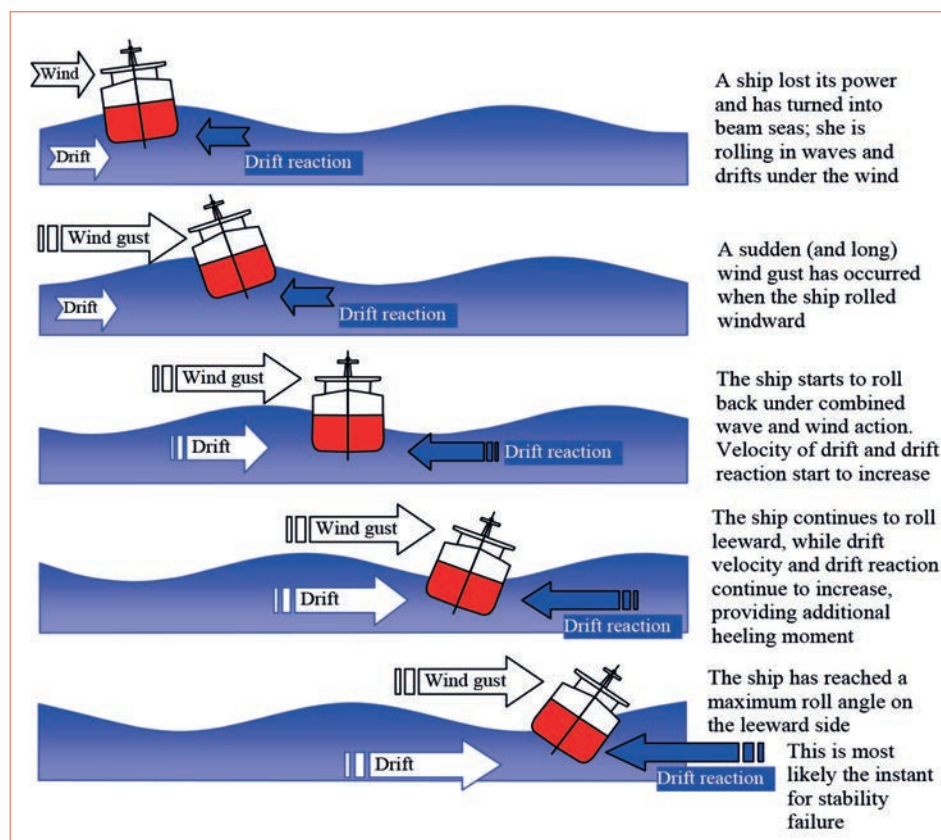


Fig. 47: Escenario de un fallo de estabilidad en la condición de **“buque muerto”**.

diferenciar los dos conceptos siguientes: “cubierta en el agua” y “agua en cubierta”. La primera situación “cubierta en el agua”, se produce cuando la cubierta entra en el agua pudiendo considerar esta agua como un dominio fluido que conduce al desarrollo de fuerzas hidrodinámicas en las superficies de la cubierta del buque. La segunda situación “agua en cubierta”, se origina cuando el agua atrapada en cubierta, sin interferencia del agua de mar con el dominio fluido exterior, actúa como una masa en movimiento cuando los buques se balancean. Estos efectos se conocían desde finales de los años sesenta, siendo analizados profundamente por IMCO STAB/INF. 2,1966.

Los balances duros y excesivos pueden generar un fallo en la estabilidad del buque en la condición de “**buque muerto**”. A medida que la geometría submarina cambia con el movimiento de carga, la curva puede conducir a un movimiento de balance paramétrico: este tipo de movimientos también pueden ser una preocupación en la condición que nos ocupa.

ESTRUCTURA DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD DINÁMICA

El criterio de estabilidad dinámica para la evaluación de la pérdida de estabilidad de un buque entre olas está basado en la consideración de los siguientes aspectos principales:

1. Condición de carga o lastre de un buque. De aquí se puede extraer la coordenada vertical crítica del centro de gravedad KG , que conduce a un valor crítico de su altura metacéntrica GM , por último, el valor máximo positivo del brazo GZ medido en la cresta de la ola.
2. La coordenada vertical crítica del centro de gravedad KG por encima del KG máximo necesario que conduce a un GM mínimo impuesto por los actuales criterios de estabilidad de la IMO que nos dice: $GM < 0,15$ metros.
3. La evaluación de la pérdida

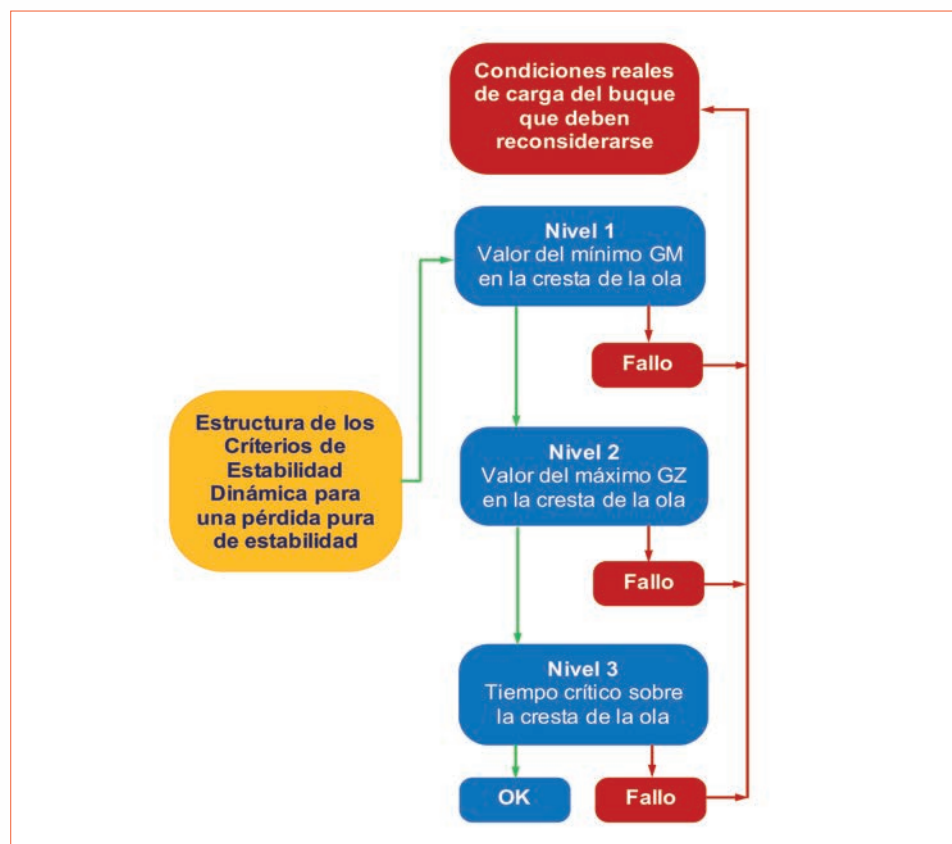


Diagrama - 2: Criterios dinámicos por pérdida de estabilidad.

pura de estabilidad descansa en la corrección entre el momento en que la cresta de la ola pasa a lo largo del casco del buque y los grandes ángulos de escora indicados en el periodo de balance del buque.

Según el criterio de estabilidad dinámica, estamos más interesados en evaluar la estabilidad dinámica residual del buque en las siguientes condiciones:

- Traslado de cargas a bordo.
- Elevación de pesos a bordo.
- Acciones escorantes originadas por la mar.
- Presencia de momentos escorantes generados por el viento.

Estos cuatro casos dan lugar a un momento escorante que se puede trazar. El área entre la curva de momentos escorantes y la curva de estabilidad estática, es la estabilidad dinámica residual, y es menor que la estabilidad dinámica en ausencia de cualquiera de estas fuerzas perturbadoras. Este valor se evalúa para cada condición de carga y se contabiliza con un criterio establecido por los órganos rectores.

SIMBOLOGÍA

A	=	Área.
A_{S-ola}	=	Altura significativa de la ola.
A_t	=	Área de un trapecio.
A_v	=	Área de la superficie expuesta al viento en metros cuadrados.
$\ddot{a}$	=	Aceleración angular.
B_e	=	Brazo escorante debido al viento.
BD	=	Brazo de estabilidad dinámica o dinámico.
C_0	=	Centro del volumen de carena o sumergido (posición inicial).
$C_0 G_0$	=	Separación inicial vertical en el plano diametral o crujía entre los centros de gravedad y carena.
C_m	=	Calado medio.
C_D	=	Coefficiente de resistencia al avance.
DT	=	Estabilidad dinámica total.
DP	=	Estabilidad dinámica parcial.
dE_c	=	Energía cinética neta.
E_R	=	Energía cinética de rotación.

E_p	=	Energía potencial.
E_c	=	Energía cinética.
E_t	=	Energía total.
E_F	=	Eslora de flotación de un buque.
ED	=	Energía dinámica.
E	=	Eslora del buque.
F_W	=	Fuerza o presión del viento de través.
F_M	=	Fuerza o resistencia del agua de la mar.
G	=	Centro de gravedad del buque.
G_0Z	=	Brazo estático o brazo de estabilidad estática.
h	=	Distancia vertical entre los centros de gravedad del área expuesta al viento y de resistencia lateral.
h_θ	=	Altura metacéntrica generalizada.
I_x	=	Momento de inercia del buque con respecto a un eje longitudinal que es el eje de giro.
I_{xG}	=	Momento de inercia de la masa.
KC	=	Coordenada vertical del centro de carena.
KG	=	Coordenada vertical del centro de gravedad.
L_{m-ola}	=	Longitud media de la ola en metros.
L_R	=	Longitud de la ola en metros
M	=	Manga del buque.
M_e	=	Par motor o momento escorante transversal.
M_a	=	Par o momento adrizante o resistente transversal.
M_T	=	Momento total.
M_d	=	Momento dinámico transversal.
M_v	=	Momento o par mínimo de vuelco del buque.
m/h	=	Millas náuticas recorridas por hora navegada.
H_H	=	Trabajo realizado por un momento escorante arbitrario.
O	=	Punto origen de coordenadas.
P_e	=	Par escorante o motor.
P_a	=	Par adrizante o resistente.
P_v	=	Presión por unidad de superficie en kilogramos / metro cuadrado.

R_E	=	Reserva de estabilidad.
R_L	=	Centro de resistencia lateral.
T	=	Trabajo.
T_A	=	Trabajo del par adrizante.
T_E	=	Trabajo del par escorante.
T_e	=	Periodo de encuentro o confluencia con las olas.
T_R	=	Trabajo resistente.
T_r	=	Periodo de balance natural del buque.
T_w	=	Periodo de la ola.
V	=	Velocidad del viento en nudos.
V_c	=	Volumen de la cuña de inmersión/emersión.
V_m	=	Velocidad de máquinas del buque.
v	=	Centro de gravedad de la superficie del buque expuesta al viento.
$\hat{\theta}_{Cd}$	=	Ángulo crítico de equilibrio dinámico o ángulo límite de estabilidad.
$\hat{\theta}_{Ce}$	=	Ángulo crítico de estabilidad estática.
$\hat{\theta}_e$	=	Ángulo de escora permanente del buque.
$\hat{\theta}_{Ed}$	=	Ángulo de equilibrio dinámico.
$\hat{\theta}_{EP}$	=	Ángulo de escora permanente o ángulo de equilibrio estable.
$\hat{\theta}_r \approx \hat{\theta}_i$	=	Ángulo de inundación progresiva (inmersión de las aperturas).
$\hat{\theta}_k$	=	Ángulo de alcance de la curva de estabilidad estática transversal.
$\hat{\theta}_o$	=	Ángulo de equilibrio resultante.
$\hat{\theta}_t$	=	Ángulo de tumba.
$\hat{\theta}$	=	Ángulo de inclinación transversal o escora.
$d\theta$	=	Ángulo de giro transversal en radianes.
Δ_a	=	Desplazamiento aparente del buque entre olas.
Δ	=	Desplazamiento del buque.
V_m	=	Velocidad del buque o de máquinas.
λ_o	=	Longitud de la ola.
∇	=	Volumen sumergido, de la obra viva o carena

α	=	Ángulo de quilla o confluencia ($\alpha = 0^\circ$ con la mar de popa y $\alpha = 90^\circ$ con la mar de estribor).
γ	=	Densidad del agua en la que flota el buque.
λ	=	Brazo escorante.
λ_e	=	Longitud de la onda.
ω	=	Velocidad angular.
$\Delta \cdot GZ$	=	Magnitud del momento adrizante.

REFERENCIAS

1. **Bonilla de la Corte, Antonio:** “Teoría del Buque”, 3ª edición, Cádiz, 1979, págs. 135-141 y 389-404.
2. **Olivella Puig, Joan:** “Teoría del Buque – Flotabilidad y Estabilidad”, Reimpresión 2ª edición, Barcelona, marzo 2001, págs. 205-223.
3. **Olivella Puig, Joan:** “Teoría del Buque – Estabilidad, Varada e Inundación”, Reimpresión 1ª edición, Barcelona, febrero 2004, págs. 231-241.
4. **García-Doncel Rodríguez, Baldomero:** “Teoría del Buque”, Tomo I, Cádiz, diciembre 1972, págs. 185-190.
5. **Pérez Gómez, Gonzalo:** “Teoría del buque (Máquinas) Tomo I”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (Universidad Politécnica de Madrid), págs. 13.1-13.6
6. **Barrass, Bryan & Derret D.R.:** “Ship stability for master and mates”, sixth edition – consolidate 2006, pp. 227-231.
7. **Palomo López, Olavo:** “Apuntes de Teoría del Buque”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales y Oceánicos, Universidad Politécnica de Cartagena (Murcia), págs. 78-89.
8. **Alaez Zazurka, José Antonio:** “Teoría del buque (I)”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (Universidad Politécnica de Madrid), Grupo VIII, págs. XVI-1 a XVI-3.

9. **Martínez García, José Iván:** “Problemas de Teoría del Buque, Estática”, Primer edición, 2015, págs. 157-168.
10. **Díaz Fernández, Cesáreo:** “Teoría del Buque”, segunda edición, Barcelona, octubre 1972, págs. 267-285.
11. **Godino Gil, Carlos:** “Teoría del Buque y sus aplicaciones (estática del buque)”, Volumen 1, 2ª edición, Barcelona, 1956, págs. 197-202.
12. **Mandelli, Antonio:** “Elementos de Arquitectura Naval”, 3ª edición, Buenos Aires (Argentina), 1986, págs. 76-81.
13. **Pursey, H.J.:** “Merchant ship stability”, metric edition, Glasgow, 1996, pp. 86-89.
14. **Pérez Gómez, Gonzalo:** “Teoría del Buque (Máquinas)”, Tomo I, Flotabilidad y Estabilidad, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid, págs. 13.2 - 13.4.
15. **Cristian Andrei, Marinel Danut Lamba & Radu Hanzu Pazara:** “A proposed criterion for assessment the pure loss of stability of ships in longitudinal waves”, U.P.B. Sic. Bull., Series D, Vol.77, Iss.2, 2015, pp. 86-88.
16. **Russian Maritime Register of Shipping:** “Rules for the classification and construction of sea-going ships”, part IV, Stability, Saint-Petersburg, edition 2017, pp. 51-54
17. **Bustabad Rey, José Antonio & Zarate Maruri, Homero:** “El bulk-carrier en la práctica”, Bilbao, 1980, págs.17-22.
18. **K. J. Rawson & E. C. Tupper:** “Basic ship theory – Hydrostatics and Strength”, Fifth edition, Volume 1, Chapters 1 to 9, 2001, pp.125-127.
19. **A. B. Biran:** “Ship Hydrostatics and Stability”, Faculty of Mechanical Engineering, Frist published 2003, pp. 128-131.
20. **Arias Crespo, Carlos:** “Estudio de los parámetros necesarios para establecer las medidas de actuación por tipos de buques en situaciones de emergencia después de un accidente”, Tesis doctoral leída en la Universidad Politécnica de Madrid.
21. **De Juana Gamo, Javier:** “Fenómenos dinámicos de estabilidad de un buque en olas longitudinales: resonancia paramétrica, influencia en el proyecto y equipo. Guía operacional al Capitán”, Departamento de Arquitectura y Construcción Naval, Escuela técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid, año 2015.
22. **Vladimir Shigynov, Ould el Moctar, Thomas E. Schellin, Jan Kaufmann & Rasmus Stute:** “Assessing the dynamic stability of an offshore supply vessel”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, March 2012.
23. **W. Garzke, Johnson and Landsburg:** “Trim, stability and loading manuals: a survey of needs, uses and improvements”, SNAME, Volume 82, 1974.
24. **M. Yamagata:** “Standard of stability adopted in Japan”, RINA, volume 101, 1959.
25. **G. Thomson and J. Tope:** “International considerations of intact stability standards”, RINA, Volume 112, 1970.
26. **Sarchin T.H. & Goldberg L.L.:** “Criterio de estabilidad y flotabilidad para los buques de superficie de la marina de guerra de los Estados Unidos”, SNAME, noviembre 1962, Ingeniería Naval, número 336, junio 1963, págs. 217-223.
27. **Grinnaert Francois, Billard Jean-Yves & Laurens Jean-Marc:** “KGmax curves associated with second generation intact stability criteria for different types of ships”, Journal of Marine Science and Application, Springer Verlag (Germany), 2016, pp. 223-235.
28. **Bruno Fúster, Manuel:** “El sin-cronismo y la estabilidad comprometida del buque”, Ingeniería Naval, número 467, Tomo XLII, 1974, págs. 362-366.
29. **Clark, Ian C.:** “Stability, trim and strength for merchant ships and fishing vessels”, Second edition, the Nautical Institute, 2008, London, pp. 102-107.
30. **Alonso, Marcelo & Finn, Edward J.:** “Fundamental University Physics”, Volume 1 - Mechanics, Addison Wesley Publishing Company, Massachusetts, USA, 1967, pp. 251-259.
31. **Gómez Seva, Alfredo:** “Método de reglamentación de la estabilidad de un buque sin avería”, Ingeniería Naval, núm. 370, abril 1966, págs.124-131.
32. **Pérez Rojas, Luis, Zamora Rodríguez, Ricardo & Valle Cabezas, Jesús:** “El efecto de escala en la determinación del Movimiento de Balance de un Buque”, Ingeniería Naval, junio 2004, págs. 107 – 111.
33. **Vega Sanz, Rafael:** “Criterio ruso de estabilidad del buque intacto”, tomado de la versión aparecida en el volumen II editado por la Organización Intergubernamental Consultiva de la Navegación Marítima, Ingeniería Naval, Núm.304, octubre 1960, págs.421-430.
34. **Gómez Seva, Alfredo:** “Método de reglamentación de la estabilidad de un buque sin averías”, Ingeniería Naval, número 370, abril 1966, págs. 124-131.
35. **Zapata Molina, Francisco:** “Procedimiento práctico de determinación de la estabilidad dinámica de un buque en diversas situaciones de carga”, Ingeniería Naval, núm. 531, tomo XLVII, 1979, págs. 298-315.
36. **Zapata Molina, Francisco:** “Algunas consideraciones sobre la estabilidad de los buques”, Ingeniería Naval, núm. 518, tomo XLVI, 1978, págs. 412-423.
37. **Ji Xi-Qi, Wu Ming-Chuan and**

Lin Jie-Ren: “On the criteria for evaluating intact stability of ships in wind and waves”, Marine Design and Research Institute of China, Shanghai Chiao Tung University, China, pp. 733 – 741.

38. **Igor Backalov, Gabriele Bulian, Jakub Cichowicz, Eleftheria Eliopoulou, Dimitris Konovessis, Jean-Francois Leguen, Anders Rosén and Nikolaos Themelis,** “Ship stability, dynamics and safety: status and perspectives”, 12th International Conference on the Stability of

Ships and Ocean Vehicles, STAB 2015, June 2015, Glasgow, Scotland, Volume 1, pages 1-57.

39. **Japan P&I Club, P&I Loss Prevention Bulletin:** “Marine Weather Ship Handling in Rough Seas”, Vol.45, April 2019, pages. 72-97.
40. **William N. France, Marc Levadou, Thomas W. Treakle, J. Randolph Paulling, R. Keith Michel, and Colin Moore:** “An investigation of head-sea parametric rolling and its influen-

ce on container lashing systems”, SNAME Annual Meeting 2001 Presentation.

41. **Cortés Echanove, Jesús:** “Resonancia en la mar”, Revista de divulgación marítima “Recalada”, núm.183, Febrero 2021, págs. 16-22.
42. **Shama, M.A.:** “On the probability of ship capsizing”, Delft University of Technology, Schiff & Hafen, SMM-Sonderausgabe, September 1976, pp. 870-872. ■

