

## CAPITULO 6

### Estabilidad transversal a grandes ángulos

#### Oscilación forzada de gran amplitud

Las tormentas en el mar generan una masiva transferencia de energía desde el viento a la masa oceánica provocando condiciones de oleaje que pueden llegar a ser extremas con alturas que pueden superar ampliamente el puntal en buques de gran porte.

La combinación de ambos fenómenos afecta a los buques durante su navegación, forzando movimientos que pueden llegar a límites más allá de los cuales su integridad no está asegurada.

La capacidad hidrostática e hidrodinámica de éstos de soportar las duras condiciones mencionadas está directamente asociada a las características de sus cascos, sus formas y dimensiones, que definen junto con la distribución de pesos abordo, la capacidad de restauración de la condición de equilibrio inicial, cada vez que los elementos los alejan de ella.

#### Límites de la condición de estabilidad transversal inicial

Se ha definido el metacentro como el centro de giro instantáneo del flotador en asociación con el movimiento pendular de una masa, estando directamente vinculado a la inercia de su flotación y su desplazamiento.

En las condiciones de equilibrio inicial, se estableció para dos flotaciones isocarenas próximas que el radio de giro para ese movimiento infinitesimal estará dado por la expresión:

$$\rho = \frac{I}{V_0} \quad [1.]$$

donde

$\rho$  es el radio de giro entre ambas flotaciones alrededor de un eje y

$I$  es la inercia de la flotación en equilibrio

$V_0$  es el desplazamiento de las isocarenas

En términos prácticos se acepta que la condición de equilibrio inicial puede extenderse algunos grados. Las formas diversas de los buques, las relaciones entre sus esloras y mangas hacen que los límites de validez de dicha condición no sean fijos y puedan tener algún sesgo en relación con el buque o tipo de buque estudiado.

En términos generales, puede ser utilizado como criterio lo definido por la OMI en el Código de Estabilidad IS 2008, numeral 8.2.2.8, donde se establece que la

amplitud admisible del ángulo de escora durante el experimento de inclinación no debería superar los cuatro grados como máximo a cada banda, entendiéndose que en ese rango se estarían cumpliendo las hipótesis de equilibrio inicial.

Independientemente de cuál sea el ángulo final que se considere como extensión de la estabilidad inicial, una vez superado dicho valor, la evaluación de los fenómenos dinámicos asociados a la escora inducida y los efectos restauradores inmediatos deben ser considerados a través de un análisis diferente.

### Falso metacentro

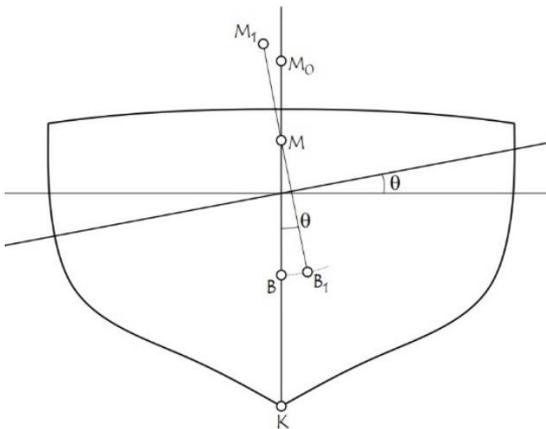


Fig. 1 - Falso metacentro

caracterización de la respuesta del buque a los amplios movimientos de rolo generados por agentes externos.

### Momento de restauración para grandes ángulos

Se analizará a continuación la situación del buque cuando se produce una escora fuera del rango de la estabilidad inicial.

El cambio en la flotación debido al rolo transforma la carena inicial, con centro en  $B_0$ , en la nueva isocarena con su centro en  $B_1$ . Los empujes en ambas situaciones se aplican a través de los centros correspondientes, siendo las distancias respectivas a los metacentros  $M_0$  y  $M_1$ , los radios metacéntricos de cada una de las condiciones consideradas. El punto  $M$  o falso metacentro identifica la intersección de ambas rectas referenciales, de acuerdo con lo indicado en el párrafo anterior (Fig. 2).

Al permanecer fijo el centro de gravedad durante este movimiento, aparece una excentricidad en la aplicación de las fuerzas presentes, el peso  $W$  y el empuje  $E$ . Ambas dejan de anularse mutuamente, surgiendo como consecuencia de la nueva

condición dinámica un momento o par que deberá restaurar la condición de equilibrio inicial.

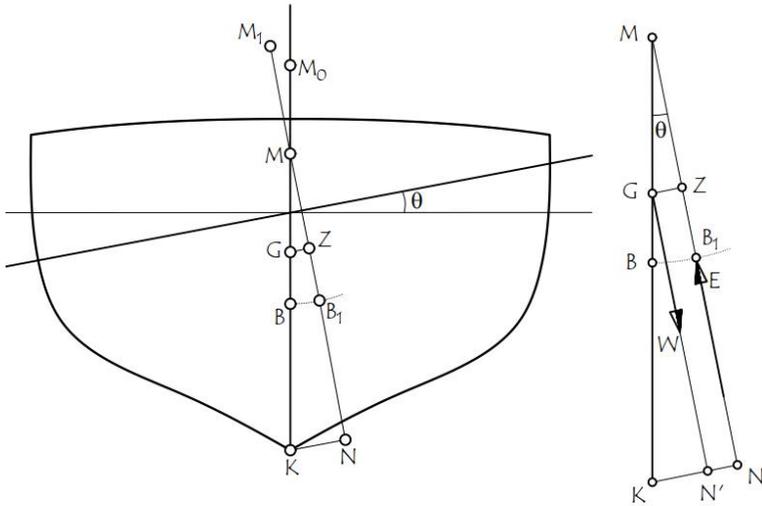


Fig. 2 - Momento de restauración para grandes ángulos

Al analizar la situación generada luego del rolado hasta un cierto ángulo  $\theta$ , se puede calcular ese par resultante:

$$M = \Delta \cdot GZ \tag{2.}$$

donde  $GZ$  es la distancia entre los vectores correspondientes al peso y al desplazamiento, y por tanto representa el brazo de palanca asociado al par generado que se denomina *momento de adrizamiento*. Corresponde analizar esta magnitud de manera de poder deducir una expresión analítica que facilite su utilización en los cálculos de estabilidad.

La flotación girada y la correspondiente a la carena derecha definen el ángulo de escora en el movimiento de giro. La perpendicular por el centro de carena  $B_1$  a la flotación contiene el metacentro  $M_1$  para esta nueva condición, mostrando la dirección  $B_1M_1$  el vector de aplicación del empuje, paralela a la dirección de aplicación del peso en esa misma condición.

En la representación geométrica de la Fig. 2,  $GZ$  es normal a  $MZ$  al igual que  $KN$  lo es respecto a  $MN$ ; siendo  $GN'$  paralela a  $ZN$ , resulta que el cuadrilátero  $GZNN'$  es un paralelogramo, de donde surge que  $GZ = N'N$ , pudiéndose expresar:

$$GZ = N'N = KN - KN' \quad [3.]$$

Por su parte  $KN'$  guarda relación geométrica con la posición vertical de  $G$ , siendo:

$$KN' = KG \cdot \text{sen}\theta \quad [4.]$$

Teniendo en cuenta las expresiones de las ecuaciones 3 y 4, se puede presentar una expresión desarrollada para la determinación algebraica del momento de adrizamiento:

$$M = \Delta \cdot GZ = \Delta \cdot (KN - KG \cdot \text{sen}\theta) \quad [5.]$$

Este momento restaurador tiene entonces un brazo de acción  $GZ$  que puede representarse algebraicamente como:

$$GZ = KN - KG \cdot \text{sen}\theta \quad [6.]$$

El término  $KG \cdot \text{sen}\theta$  está directamente asociado con la distribución de pesos del buque, en la medida que  $KG$  representa la posición vertical del centro de gravedad que se ha definido anteriormente como  $VCG$ .

Por otro lado, el término  $KN$ , distancia desde el punto  $K$  definido por la intersección del plano de crujía y el plano base a la recta  $B_1M_1$ , dependerá únicamente de las características de la forma de la carena en su constante transformación debido al movimiento de rolido generado por las fuerzas externas.

### **Distribución de pesos**

Como se ha establecido previamente, la estabilidad está fuertemente condicionada por la posición vertical del centro de gravedad, la cual depende directamente de la distribución de pesos del buque.

A partir del estudio de la distribución de pesos, que incluirán el del buque vacío, consumibles, tripulación, pasaje y carga con sus respectivos centros de gravedad asociados, se podrá determinar el peso del buque en carga o desplazamiento y la posición completa del centro de gravedad en sus componentes longitudinal y vertical, siendo esta última la que deberá ser considerada a los efectos de los cálculos de estabilidad.

### **Brazo de adrizamiento básico $KN$**

Se supondrá por un momento que el centro de gravedad del buque estuviera ubicado sobre la base de apoyo del buque o plano base, coincidiendo entonces con la posición del punto que hemos identificado por la letra  $K$ . En ese caso  $KG = 0$ , ante lo cual el brazo del momento restaurador se transforma en el término  $KN$ .

Se puede establecer entonces que  $KN$  representa el brazo de adrizamiento de un buque para una posición vertical ficticia del centro de gravedad sobre el plano de referencia.

El brazo de adrizamiento real se determinará entonces a partir del valor del brazo de adrizamiento básico y su corrección mediante la elevación del centro de gravedad desde su posición ficticia inicial en  $Z = 0$  a su posición real en  $Z = VCG$ , representada en la formulación por el término  $KG \cdot \text{sen } \theta$ .

Lo interesante de este planteamiento es que  $KN$  es un parámetro asociado a la geometría de la carena y por lo tanto puede ser tratado en forma análoga a la que fuera desarrollada para la representación de las propiedades o atributos de carenas derechas a través de las correspondientes Curvas Hidrostáticas.

### Determinación de $KN$ como parámetro hidrostático

El segmento  $KN$  está definido por la perpendicular desde  $K$  a la recta que pasa por los puntos  $B_1$  y  $M_1$ , siendo entonces por definición la distancia desde ese punto a la mencionada recta.

El abordaje a través de la geometría analítica permite determinar la ecuación de la recta  $B_1N$  conociendo la pendiente de esta, y como se verá a partir de dicho análisis, el valor de  $KN$  podrá ser definido.

Para un ángulo de la flotación  $\theta$ , la pendiente de  $B_1N$  será

$$\frac{\pi}{2} + \theta, \text{ cumpliéndose entonces que } \text{tg} \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{1}{\text{tg} \theta};$$

la recta  $B_1N$  quedará definida por la siguiente ecuación:

$$z - z_N = \text{tg} \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \cdot (y - y_N) = -\frac{1}{\text{tg} \theta} \cdot (y - y_N) = \frac{\cos \theta}{\text{sen} \theta} \cdot (y_N - y) \quad [7.]$$

El punto  $N$  tendrá como coordenadas  $y_N = KN \cdot \cos \theta$  y  $z_N = KN \cdot \text{sen} \theta$ , con lo cual la ecuación (7) se transforma en:

$$z \cdot \text{sen} \theta + y \cdot \cos \theta = KN \quad [8.]$$

que es verificada por las coordenadas de cualquier punto perteneciente a la misma, en particular las del punto  $B_1 (x_{B1}, y_{B1})$ ; de esta manera, podrá  $KN$  ser determinado en forma sistemática mediante la expresión:

$$KN = z_{B1} \cdot \text{sen} \theta + y_{B1} \cdot \cos \theta \quad [9.]$$

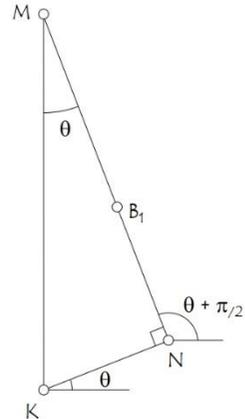


Fig. 3 - Determinación algebraica de  $KN$

## Representación gráfica del Brazo de Adrizamiento Básico

Si se consideran las infinitas isocarenas y los infinitos ángulos que puede tomar cada una de ellas, la magnitud  $KN$  tendrá una representación gráfica similar a la de la Fig. 4:

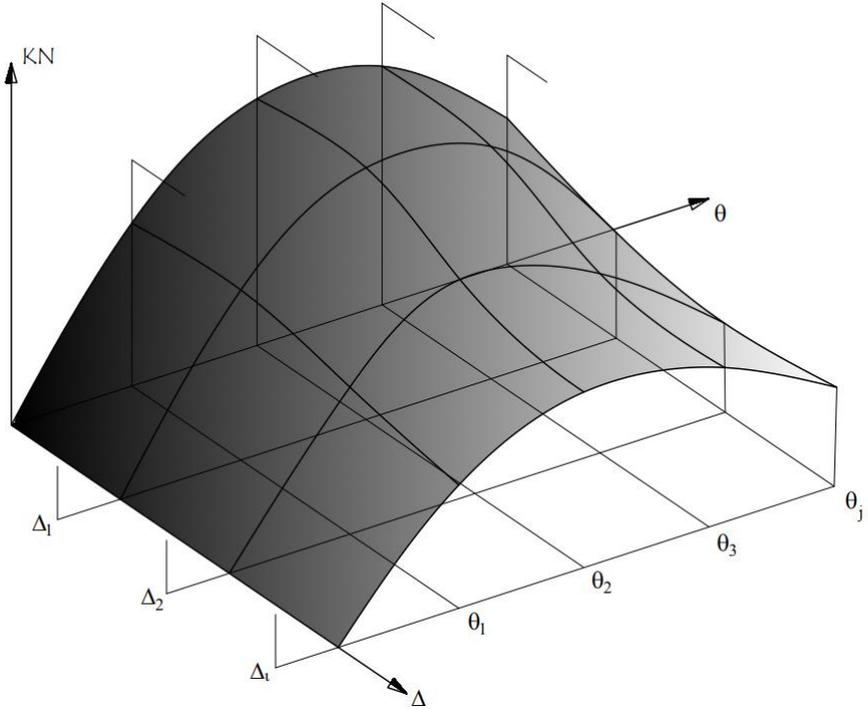


Fig. 4 - Desarrollo de la superficie  $KN$

La proyección sobre el plano  $KN - \Delta$  de las secciones rectas definidas por la intersección de la superficie con los planos que representan las escoras seleccionadas, genera una familia de curvas  $KN(\theta)$  que recibe el nombre de *Curvas Cruzadas* debido al comportamiento de estas, según se puede observar en la Fig. 5:

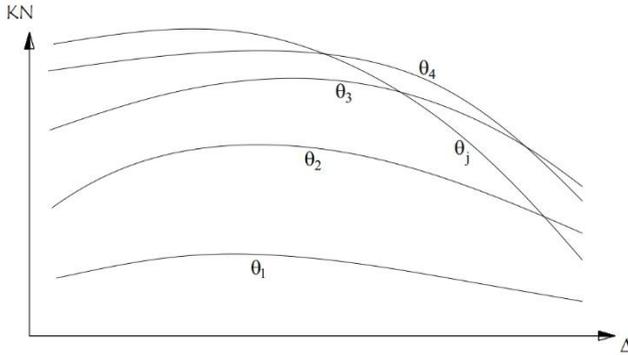


Fig. 5 - Curvas Cruzadas

### Curva de Estabilidad

El interés final es estudiar el comportamiento del brazo de adrizamiento  $\rho$  ante las escoras que se generan durante el balanceo del buque.

Establecida una distribución de pesos con su correspondiente centro de gravedad, se puede determinar la función que muestra la variación del brazo de adrizamiento al variar el ángulo de escora, teniendo presente que los valores del brazo de adrizamiento virtual serán deducidos de las curvas cruzadas para el desplazamiento específico.

Los valores para un desplazamiento dado, de acuerdo con lo mostrado en la figura 4, se corresponden con la intersección de la superficie  $KN$  con el plano  $\Delta = \Delta_i$ . En la proyección plana denominada Curvas Cruzadas, dicho plano está representado por una semirrecta vertical y los valores de  $KN = KN(\theta_j)$  surgirán de la intersección de ésta con las curvas de escora constante  $\theta_j$ .

Por su parte, la componente asociada a la distribución de pesos generará también una correspondencia en función del ángulo de escora,  $KG \cdot \text{seno}(\theta_j)$ .

La representación gráfica de estos valores de  $GZ(\theta_j)$  habiendo completado la composición  $GZ = KN - KG \cdot \text{sen}\theta$  es denominada *Curva de Estabilidad*, y muestra el comportamiento del brazo de adrizamiento en la evolución del buque en el movimiento de balanceo o rolido.

En la Fig. 6 están graficadas las componentes que definen la curva  $GZ$ , identificada por ciertos valores característicos que serán analizados a continuación.

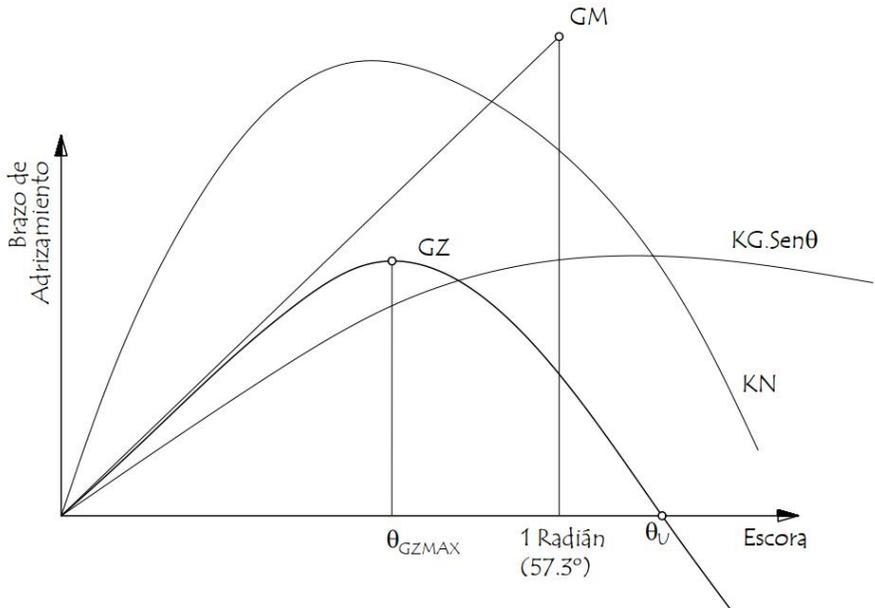


Fig. 6 - Curva de estabilidad

Primeramente, se debe recordar que para pequeños ángulos el régimen de estabilidad se asocia con el movimiento oscilatorio en el entorno de una condición de equilibrio, cuyo centro era el metacentro inicial y cuyo brazo se define como radio metacéntrico, habiéndose deducido que  $GM_r$  representaba la pendiente de la función  $GZ$  en el entorno de la condición de equilibrio.

Esta pendiente es positiva en la medida que la condición de equilibrio debe ser estable; a medida que nos alejamos de la posición inicial el comportamiento de los valores de  $KN$  y  $KG.\text{sen}\theta$  definirán la forma de la curva  $GZ$ .

El término  $KN$  tiene un comportamiento creciente hasta llegar a un máximo a partir del cual comienza a disminuir su valor, siendo positivo en todo el rango entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Por su parte, también el término  $KG.\text{sen}\theta$  es creciente y positivo en el mismo rango.

La diferencia entre ambos valores llega a un punto máximo que se corresponde con un momento de adrizamiento máximo, el cual es deseable se produzca lo más alejado de la condición inicial posible. La posterior disminución de  $GZ$  equivale a un debilitamiento progresivo de la capacidad de restauración del equilibrio.

Finalmente, las curvas  $KN$  y  $KG.\text{sen}\theta$  terminan tomando el mismo valor, momento en el cual  $GZ$  se hace nulo, alcanzando la condición de pérdida de estabilidad.

Esta condición tiene las características de una posición de equilibrio indefinido. Si se considera un desplazamiento infinitesimal  $d\theta$  previo a dicha condición, la estabilidad es positiva, mientras que en la posición posterior será negativa.

Es necesario evitar llegar a dicha posición con una cierta inercia, dado que una vez superada el buque se enfrentará a una condición en la cual el momento de adrizamiento comienza a tomar valores negativos, transformándose en un momento escorante que forzará el progresivo alejamiento en relación con la posición de equilibrio inicial hasta encontrar una nueva en condiciones ideales (sin inundación progresiva), con una escora de  $180^\circ$ , en un movimiento conocido como *vuelta de campana*.

### Evaluación de agentes externos en la estabilidad intacta

Los mismos factores que afectan la estabilidad inicial y que fueron presentados en el capítulo 5, son responsables también por la modificación de las características finales de la curva de estabilidad.

### Estabilidad con movimiento transversal de pesos

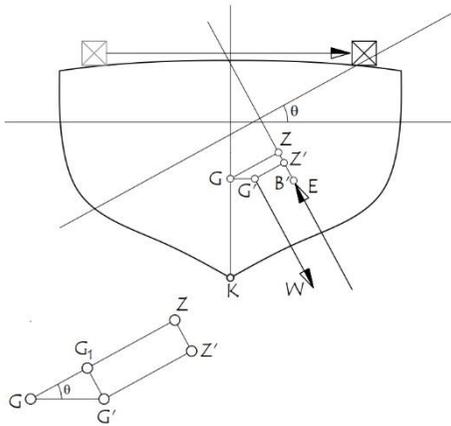


Fig. 7 - Afectación de la estabilidad por movimiento transversal de pesos

El movimiento transversal de pesos genera un corrimiento lateral del centro de gravedad del buque fuera del plano de crujía, provocando una escora permanente hacia la misma banda. Adicionalmente el valor del brazo de adrizamiento es afectado de acuerdo con lo que se puede deducir del análisis de la Fig. 7.

En la nueva ubicación del centro de gravedad, el brazo de adrizamiento  $G'Z'$  debe ser recalculado.

$$G'Z' = GZ - GG_1 \quad [10.]$$

$$GG_1 = GG' \cdot \cos\theta \quad [11.]$$

$$G'Z' = GZ - GG' \cdot \cos\theta \quad [12.]$$

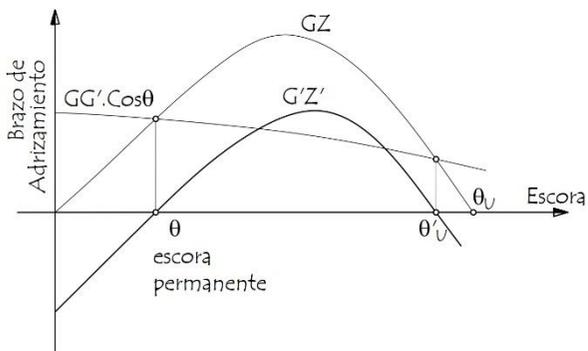


Fig. 8 - Curva de estabilidad afectada por movimiento lateral de pesos

La nueva componente en la formulación del brazo de adrizamiento es la responsable de la disminución de su valor inicial, considerando el giro en el mismo sentido que el provocado por el movimiento del peso.

La curva de estabilidad muestra como la excentricidad del centro de gravedad fuera del plano de crujía traslada

la condición de equilibrio inicial al ángulo de escora permanente  $\theta_{ep}$  generado por el movimiento del peso hacia esa banda, en correspondencia con la intersección de la curva  $GZ$  y la curva  $GG'. \cos\theta$ .

Siendo positiva esta última en el dominio  $[0, 90^\circ]$ , existirá naturalmente un segundo punto de intersección con  $GZ$ , correspondiendo a este segundo punto la anulación del valor de  $G'Z'$ ; el ángulo  $\theta'u$  al cual se alcanza este estado será menor que el equivalente para la estabilidad en condiciones no alteradas, con lo cual se concluye que el movimiento transversal de pesos disminuye el dominio de acción positiva del brazo de adrizamiento, el que será ahora  $[\theta_{ep}, \theta'u]$ .

El valor máximo de la curva de estabilidad resultante será menor que el de la curva sin modificaciones según surge del análisis algebraico, produciéndose para un ángulo de escora mayor con relación a la condición original, no pudiéndose establecer a priori su posición relativa con relación a la condición de escora permanente.

### Estabilidad con superficies libres

Las superficies libres en tanques líquidos generan un efecto de pérdida de estabilidad debido al movimiento lateral de una porción de la masa contenida; dicho movimiento origina un reposicionamiento del centro de gravedad, el que puede interpretarse finalmente como una elevación virtual del mismo, pudiéndose calcular este desplazamiento vertical según la siguiente formulación:

$$GG_V = \frac{I_{LIQ}}{V} \cdot \frac{\rho_{LIQ}}{\rho_{AGUA}} \quad [13.]$$

Dicha expresión ha sido determinada para condiciones del buque adrizado, es decir, cuando el ángulo de escora  $q = 0$ , pero será utilizada en cálculos de estabilidad como un parámetro invariable e independiente del ángulo observado. En la Fig. 9 se

observa la afectación del sistema dinámico para una escora determinada, en la cual el punto de aplicación de la fuerza del peso del buque cambia de la posición real  $G$  a la virtual  $G_V$ , modificando entonces el valor del brazo de adrizamiento debido al efecto de la superficie libre del tanque líquido.

La presencia de varios tanques genera un efecto acumulativo donde la elevación virtual del centro de gravedad coincidirá con la sumatoria de cada una de las componentes correspondientes a cada uno de ellos, de acuerdo con su geometría y densidad del líquido contenido.

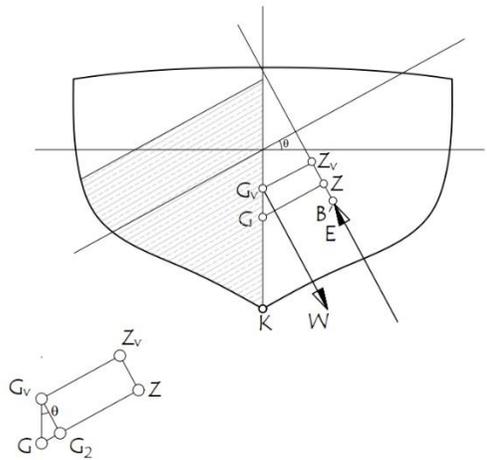


Fig. 9 - Brazo de adrizamiento afectado por superficies libres

El brazo de adrizamiento en estas condiciones será  $G_V Z_V$ , que se deduce a partir de las siguientes igualdades:

$$G_V Z_V = GZ - GG_2 \tag{14.}$$

$$GG_2 = GG_V \cdot \text{sen}\theta \tag{15.}$$

$$G_V Z_V = GZ - GG_V \cdot \text{sen}\theta \tag{16.}$$

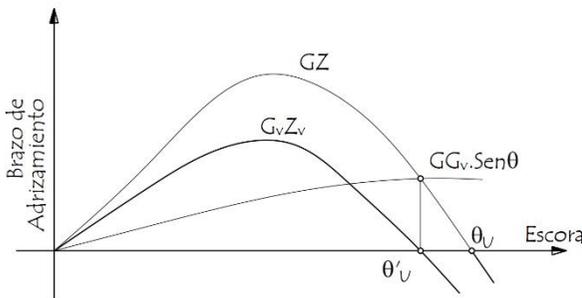


Fig. 10 - Curva de estabilidad afectada por superficies libres

La afectación de la estabilidad puede ser observada a través de la gráfica donde se incluye el efecto de las superficies libres, representados por el término  $GG_V \cdot \text{sen}\theta$ .

La intersección de  $GZ$  con la curva  $GG_V \cdot \text{sen}\theta$ , determina el punto de anulación del valor de  $G_V Z_V$ ; el ángulo al cual se alcanza este estado será menor que el equivalente

para la estabilidad en condiciones no alteradas, con lo cual se concluye que también las superficies libres disminuyen el alcance y dominio de acción positiva del brazo de adrizamiento, el que será ahora  $[\theta, \theta'u]$ .

**Estabilidad con pesos suspendidos**

Los pesos suspendidos generan un efecto de pérdida de estabilidad debido en este caso a la oscilación del peso alrededor de un punto fijo, generando directamente un momento de escora que se suma algebraicamente al momento de adrizamiento. La interpretación final de este efecto es nuevamente una elevación virtual del centro de gravedad, pudiéndose calcular este desplazamiento vertical en este caso como:

$$GG_V = \frac{H \cdot w}{V} \tag{17.}$$

En la Fig. 11 se observa la misma afectación del sistema dinámico provocada por la presencia de superficies libres para una escora determinada, en la cual el punto de aplicación de la fuerza del peso del buque cambia de la posición real  $G$  a la virtual  $G_V$ , modificando entonces el valor del brazo de adrizamiento, en este caso por efecto del movimiento del peso suspendido.

El brazo de adrizamiento afectado por cargas suspendidas, al igual que en el caso de las superficies libres en los tanques líquidos, estará definido por la siguiente expresión:

$$G_V Z_V = GZ - GG_V \cdot \text{sen}\theta \tag{18.}$$

**Estabilidad con altura metacéntrica inicial negativa**

Una situación especial se presenta cuando la condición de equilibrio inicial es inestable, esto es, cuando la altura metacéntrica  $GM$  toma valores negativos, con la posición vertical del centro de gravedad por encima de la correspondiente del metacentro inicial.

El diagrama de fuerzas muestra claramente que esta configuración es de equilibrio inestable, por lo cual el buque va a tender a girar hacia otra posición de equilibrio.

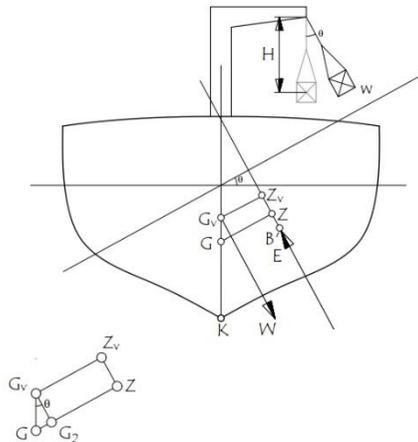


Fig. 11 - Brazo de adrizamiento afectado por pesos suspendidos

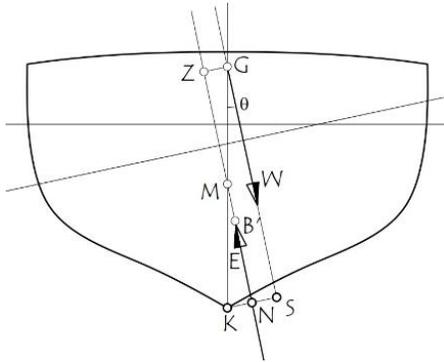


Fig. 12 - Brazo de adrizamiento afectado por posición elevada del centro de gravedad

Como fue deducido para la estabilidad inicial, la magnitud  $GM$  se corresponde con la pendiente de la curva  $GZ$  en el origen, lo que indica que la pendiente en este caso será negativa, lo cual se refleja en la gráfica correspondiente.

Desde el punto de vista de la estabilidad estática, este comportamiento puede deducirse considerando la expresión del brazo de adrizamiento:

$$GZ = KN - KG \cdot \text{sen}\theta = KN - KS \quad [19.]$$

En el entorno de la condición de equilibrio los valores de  $GZ$  serán negativos, teniendo presente que la curva tendrá pendiente negativa en el origen según se indicó en párrafo anterior; a medida que el ángulo de escora aumenta, también aumentan los valores de  $KN$  y  $KS$  y dependiendo de cuál sea su tasa de crecimiento, la magnitud de  $GZ$  puede tener un comportamiento creciente, con una condición de equilibrio al cruzar el eje horizontal y retomando valores positivos del brazo de adrizamiento, completando la forma de una curva normal.

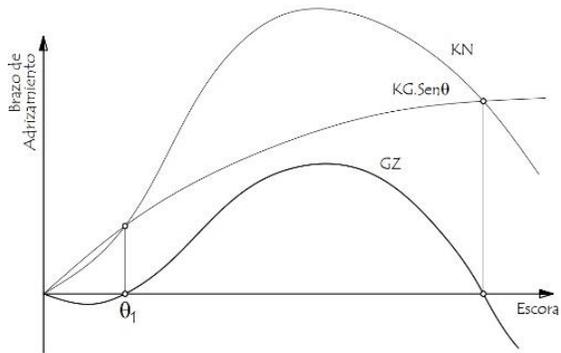


Fig. 13 - Curva de estabilidad para valores de  $KG$  muy elevados

La condición de equilibrio definida por el ángulo  $\theta_1$  claramente es estable, dado que para posiciones angulares menores el brazo del par de fuerzas tendrá un efecto de llevar el buque hacia esa posición, mientras que, alejados hacia posiciones angulares mayores, trabajará en el sentido de restituir la posición anterior.

Sin embargo, en el caso que durante la oscilación el buque encuentre la posición  $\theta = 0$ , este se será escorado rápidamente hacia la posición angular  $\theta_1$  en la banda opuesta,

generando una situación incómoda desde el punto de vista de la habitabilidad.

El otro aspecto para señalar es que el rango o alcance de la estabilidad positiva, es decir el rango angular en el cual el momento de adrizamiento efectivamente actúa tratando de restituir la condición de equilibrio, disminuye drásticamente, así como también lo hace su valor máximo y el resto de los parámetros que definen una condición normalizada de estabilidad estática aceptable.

Por último, se debe indicar que, si la posición vertical de G es suficientemente elevada, se podrá dar el caso en el cual los valores de  $KG \cdot \sin \theta$  sean superiores a los de  $KN$  en todo el rango angular, en cuyo caso los valores del brazo de adrizamiento no alcanzan nunca la condición de restauración, encontrándose entonces el buque en una condición de equilibrio inestable permanente.

### **Estabilidad dinámica**

El análisis que se ha realizado sobre la capacidad del buque de recomposición de la condición de equilibrio ha sido básicamente cuasiestático, suponiendo que se ha llegado a una condición de escora en la cual se evalúa la capacidad de restauración en términos del valor del momento de adrizamiento, sin profundizar en los mecanismos de acción y reacción que están detrás de esa imagen suspendida en el tiempo y en el espacio.

Un enfoque del sistema en movimiento aparece como un complemento necesario a los efectos de estudiar la estabilidad, donde los aspectos dinámicos y su relación con el estado energético del sistema deben ser considerados. La energía acumulada o entregada está relacionado con el trabajo realizado por el sistema de fuerzas para generar su movimiento absoluto o relativo.

Cuando se comprime un resorte, la energía acumulada estará disponible para su posterior distensión; cuando se eleva un peso, su energía potencial acumulada permitirá la caída libre del cuerpo una vez liberado éste.

En ese mismo sentido, cuando una fuerza exterior produce la oscilación del buque, la energía acumulada por la acción del momento de adrizamiento deberá estar disponible para recuperar su condición de equilibrio inicial; esta energía la denominaremos *estabilidad dinámica*, la cual puede interpretarse como una reserva de estabilidad, entendida en el mismo sentido que cualquier otra energía disponible.

Desde el punto de vista conceptual, la energía asociada a un trabajo realizado por un momento o par de fuerzas provocando el movimiento de un sistema físico, se define como:

$$\delta E = \delta W = \vec{M} \cdot \delta \vec{\theta} \quad [20.]$$

Donde  $\delta E$  es la variación de la energía producida por un trabajo  $\delta W$  realizado por un momento  $\vec{M}$  que acciona un desplazamiento angular  $\delta\vec{\theta}$  del sistema considerado.

Teniendo en cuenta que  $M = \Delta \cdot GZ$  para una cierta variación angular, la energía acumulada se puede calcular a través de un proceso de integración analítico:

$$E = W = \int \vec{M} \cdot \delta\vec{\theta} = \int \Delta \cdot GZ \cdot \delta\theta \quad [21.]$$

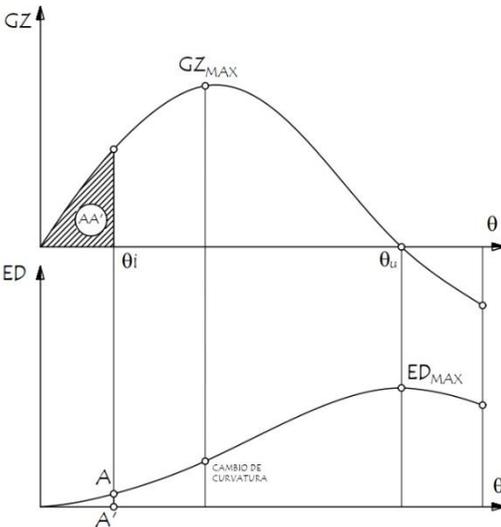


Fig. 14 - Correspondencia entre la curva de estabilidad intacta y la curva de estabilidad dinámica

Volviendo al análisis en términos específicos, independizándolo del desplazamiento que permanecerá constante durante todo el proceso, se puede señalar que la energía asociada con la escora del buque se corresponde con la integral de la curva  $GZ$  en su representación como función del ángulo de escora (Fig. 14).

Su representación gráfica en forma independiente de la propia curva de brazos adrizantes permite una mejor interpretación del comportamiento dinámico del buque y su utilización en la valoración de configuraciones de carga específicas. En la figura, la ordenada  $AA'$  se corresponde con el valor de la estabilidad dinámica para el ángulo indicado,  $ED(\theta)$ .

### Relación entre la estabilidad intacta y la estabilidad dinámica

Desde el punto de vista físico, la energía acumulada durante el movimiento de balanceo o estabilidad dinámica se relaciona con el trabajo realizado por el momento de adrizamiento en dicho proceso.

Matemáticamente, la magnitud de esa energía resulta de la integración del momento de adrizamiento en un recorrido angular definido, por lo cual las curvas correspondientes tendrán características específicas en relación con puntos especiales.

En el origen el brazo de adrizamiento es nulo, por lo cual el diagrama de estabilidad dinámica tendrá pendiente nula en  $\theta = 0$ .

En  $\theta = \theta_M$ , el valor del brazo de adrizamiento presenta un máximo  $GZ = GZ_{MAX}$ , por lo cual en el diagrama de estabilidad dinámica la curva presentará un punto de inflexión.

En  $\theta = \theta_U$ , donde se anula el brazo de adrizamiento, la curva de estabilidad dinámica presentará su valor máximo  $ED_{MAX}$ .

### **Evaluación de agentes externos en la estabilidad dinámica**

Se ha introducido un elemento adicional que comprende las acciones externas que llevan al movimiento de balanceo. En el análisis inicial, éstas fueron consideradas como las causas de este, pero no fueron cuantificadas a los efectos de considerar la afectación del buque, por lo cual corresponde hacerlo en este momento.

Se pueden identificar algunos agentes externos como los responsables del balanceo de un buque. Entre ellos se debe citar por su importancia la acción del viento, ya sea ésta en forma constante o en ráfagas. Otro caso relevante ocurre en el caso del remolque de un buque por la banda, donde la componente transversal de la fuerza transmitida a través del cabo genera un momento de escora que afecta a la embarcación remolcada y al propio remolcador.

### **Efecto del viento**

A los efectos de la estabilidad transversal, se considerará un viento o la componente que actúa perpendicular al plano de crujía. Ésta actúa sobre la estructura por encima de la flotación, en una acción que tiende a hacer derivar el buque; esa deriva encuentra una acción que se opone, la cual se podría interpretar como la de una corriente en el sentido opuesto. La interacción de ambas fuerzas es la responsable por la aparición del momento de escora asociado a este fenómeno.

La OMI ha establecido como criterio que el brazo de este momento tendrá un valor constante independientemente de la posición angular del buque, lo cual en primera instancia puede aparecer como una indicación incorrecta.

Una explicación razonable para la validación de este criterio puede ser deducida a partir del análisis que se presenta a continuación

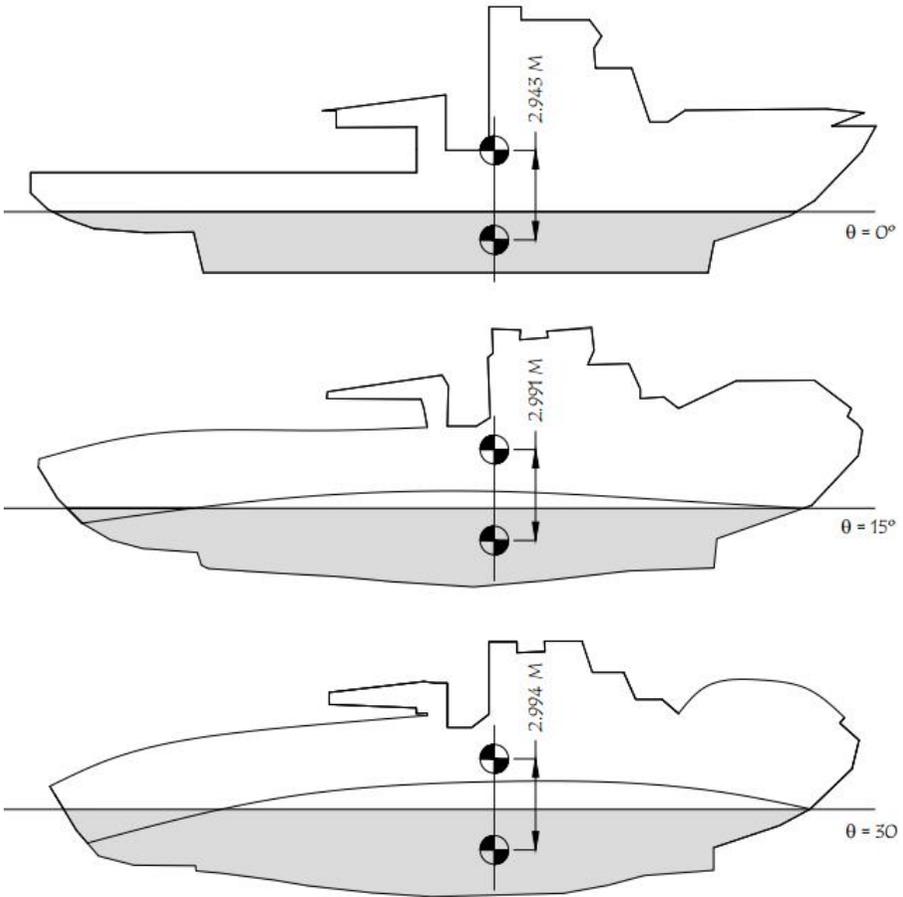


Fig. 15 - Proyección de obra viva y obra muerta para distintas escoras

La figura 15 muestra la acción del viento contra la obra muerta en la condición inicial. Luego de un período de tiempo el momento generará una escora que modificará en forma sustantiva tanto la obra muerta como la superficie de deriva.

Sin embargo, al analizar la proyección de ambas superficies se puede establecer que, en forma global, la distancia entre sus centroides permanece dentro de un rango de valores que pueden considerarse como una constante.

Esto significa que, en forma independiente del ángulo de escora, el brazo considerado permanecerá invariable en términos relativos, por lo cual idéntico tratamiento podemos asignarle al momento de escora correspondiente.

En estas condiciones, es razonable considerar que el momento escorante generado por un viento de magnitud constante es invariable en forma independiente de la posición relativa del buque escorado por esa acción, tal como lo presenta la OMI a través de la ecuación 12.

$$I_{w1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot \Delta \cdot g} \quad [22.]$$

donde

$P$  es la presión del viento para una velocidad normalizada,  $504 \text{ Pa}$

$A$  es el área proyectada de obra muerta o expuesta,  $m^2$

$Z$  es la distancia vertical entre el centroide de  $A$  y el centroide de la superficie de deriva o, en forma aproximada, el punto medio del calado medio del buque,  $m$

$\Delta$  es el desplazamiento,  $ton$

$g$  es la aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$

Esta formulación es utilizada en los cálculos que definen el criterio meteorológico. Puede deducirse que la presión utilizada como parámetro normalizado se corresponde con un viento cuya velocidad es  $v = 20.5 \text{ m/s} = 40.0 \text{ nudos}$ ; ese valor puede ser reducido para servicio en aguas restringidas a criterio de la Administración.

Una regla equivalente desarrollada para la marina de guerra utiliza otra formulación, la cual se indica a continuación:

$$I_{w1} = \frac{0.0195 \cdot v^2 \cdot A \cdot Z \cdot \cos^2 \theta}{1000 \cdot \Delta \cdot g} \quad [23.]$$

donde

$v$  es la velocidad nominal,  $100 \text{ nudos}$

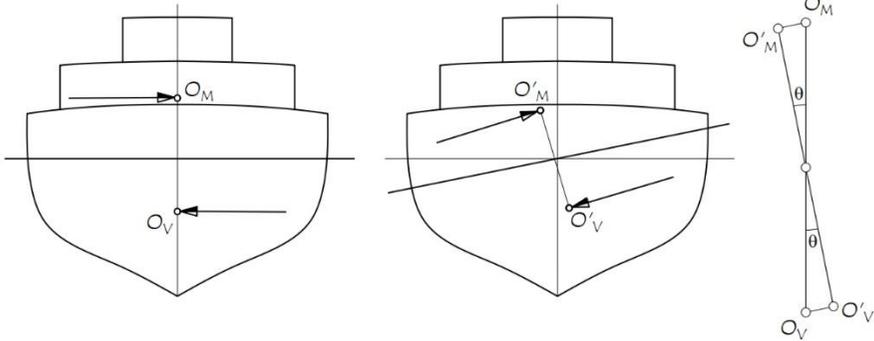
$A$  es el área proyectada de obra muerta o expuesta,  $m^2$

$Z$  es la distancia vertical entre el centroide  $O_M$  de  $A$  y la mitad del calado  $O_V$ ,  $m$

$\Delta$  es el desplazamiento,  $ton$

$g$  es la aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$

$\theta$  es el ángulo de escora,  $radianes$



Este método considera la obra viva y la obra muerta del buque adrizado como elementos referenciales para el cálculo del momento. En la condición de equilibrio, cuando  $\theta = 0^\circ$ , los valores de cálculo coinciden con los valores reales del área expuesta  $A$  y la distancia  $Z$  medida entre los centroides de las proyecciones de la obra viva o plano de deriva y la obra muerta,  $O_V$  y  $O_M$  respectivamente.

Cuando se considera una cierta escora  $\theta$  para el mismo viento, la proyección del área de la obra muerta se reduce a un valor  $A' = A \cdot \cos \theta$ , y por otro lado la distancia  $Z$  se reduce adicionalmente, pudiendo expresar su valor final en forma aproximada como  $O'_V O'_M = O_V O_M \cdot \cos \theta$ . De esta manera el momento inicial, proporcional al producto  $Z \cdot A$ , evolucionará hacia un valor proporcional a  $Z \cdot A \cdot \cos^2 \theta$ .

Por su parte, el valor de la presión del viento sobre una superficie puede escribirse según la formulación de Newton, como:

$$P_w = \frac{F_w}{A} = \frac{C_w \cdot \rho_a \cdot A \cdot v^2}{A} = 0.0195 \cdot v^2 \quad [24.]$$

Según ya fue indicado anteriormente, esta formulación para el momento de escora generado por el efecto del viento aplica sólo para buques de guerra, derivándose de antiguas expresiones de los comienzos de la ingeniería naval como ciencia.

### Efecto de las operaciones de remolque

Existen dos tipos básicos de operaciones de asistencia a buques; ambos conducen a la aparición de un momento de escora producto de la tracción ejercida por el remolcador sobre el buque remolcado a través de los cabos correspondientes, pero el mecanismo a partir del cual se genera dicho par de fuerzas difiere en uno y otro caso.

El servicio de remolque más extendido es aquél cuyo objeto es la operación náutica de ayuda a los movimientos de un buque dentro del recinto portuario, siguiendo las instrucciones del capitán del buque, mediante el auxilio de buques especializados

denominados remolcadores. La fuerza motriz, cuyo punto de aplicación es el propio propulsor, está asociada directamente con el momento escorante de remolque (*self tripping*).

El otro tipo de operación se define como escolta (*escort*), implica el acompañamiento del buque dentro del espejo de agua definido como zona portuaria, ya sea la entrada o salida al recinto o su traslado dentro del mismo. En éste como en el caso del efecto del viento, el momento escorante de escolta o acompañamiento estará asociado con la fuerza de reacción generada en la superficie de deriva (*tow tripping*).

Se puede establecer que más allá de la diferencia conceptual de las operaciones, la diferencia fundamental está determinada por las velocidades a las cuales se realizan. De acuerdo con estudios realizados en forma específica, se puede establecer un límite de 6 nudos para las operaciones típicamente portuarias, mientras que 10 nudos corresponden a una velocidad de operación en la modalidad de escolta.

### Brazo de escora

Para las operaciones de remolque portuario el brazo escorante se calcula como:

$$I_{TUG} = \frac{BP \cdot C_T \cdot (h \cdot \cos \theta - r \cdot \sin \theta)}{g \cdot \Delta} \quad [25.]$$

donde

*BP* es el empuje a punto fijo (*Bollard Pull*), *ton*

*C<sub>T</sub>* es el coeficiente de fuerza:

*C<sub>T</sub>* = 0.50 propulsión tradicional

*C<sub>T</sub>* = 1.00/(1+d/LLL) propulsor azimutal unitario

*C<sub>T</sub>* = 0.90/(1+d/LLL) dos o más propulsores azimutales; los valores de *C<sub>T</sub>* en estos casos no serán menores a 0.70 para servicio ASD (*Azimutal Stern Drive*) traccionando por popa o tipo tractor traccionando por proa, y 0.50 para servicio ASD traccionando por proa o tipo tractor traccionando por popa

*LLL* es la eslora de la línea de carga, *m*

*g* es la aceleración de la gravedad, *m/s<sup>2</sup>*

*h* es la distancia vertical entre el punto de tracción y el centroide de la unidad de propulsión, *m*

*r* es la distancia entre el plano de crujía y el paralelo que contiene el punto de tracción, *m*

*Δ* es el desplazamiento, *ton*

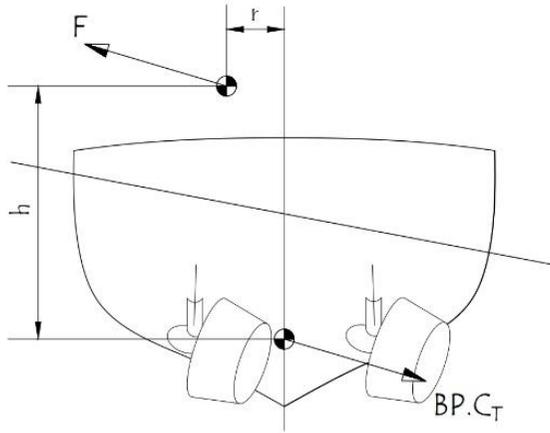


Fig. 16 - Diagrama de fuerzas durante operaciones de remolque portuario

Por su parte, para las operaciones de escolta, se calcula como:

$$I_{TOW} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p \cdot (h \cdot \cos \theta - r \cdot \text{sen} \theta + C_3 \cdot T)}{2 \cdot g \cdot \Delta} \quad [26.]$$

donde

$C_1$  es el coeficiente de tracción lateral, siendo

$$C_1 = 2.8 \cdot \left( \frac{L_s}{L_{PP}} - 0.1 \right), \text{ debiendo ser } 0.1 < C_1 < 1.0$$

$L_s$  es la distancia longitudinal desde la perpendicular de popa hasta el punto de tracción,  $m$

$L_{PP}$  es la eslora entre perpendiculares,  $m$

$C_2$  es el coeficiente de corrección angular para  $C_1$

$$C_2 = 2.8 \cdot \left( \frac{\theta}{3 \cdot \theta_d} + 0.1 \right), \text{ debiendo ser } C_2 > 1.0$$

$\theta_d$  es el ángulo hasta el trancañil, *grados*

$$\theta_d = a \tan \cdot \left( \frac{2 \cdot f}{B} \right)$$

$f$  es el francobordo en la sección media,  $m$

$\rho$  es la densidad del agua,  $1.025 \text{ ton}/m^3$

$v$  es la velocidad lateral,  $2.57 \text{ m/s}$

$A_p$  área de deriva,  $m^2$

$h$  es la distancia vertical entre el punto de tracción y el centroide del área de deriva,  $m$

$r$  es la distancia entre el plano de crujía y el paralelo que contiene el punto de tracción,  $m$

$g$  es la aceleración de la gravedad,  $m/s^2$

$C_3$  es la relación entre la distancia del centroide de  $A_p$  a la flotación y

el calado relativo al ángulo de escora

$$C_3 = 0.26 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_d}\right) + 0.3, \text{ debiendo ser } 0.5 < C_3 < 0.83$$

$T$  es el calado de la condición de carga,  $m$

$\Delta$  es el desplazamiento,  $ton$

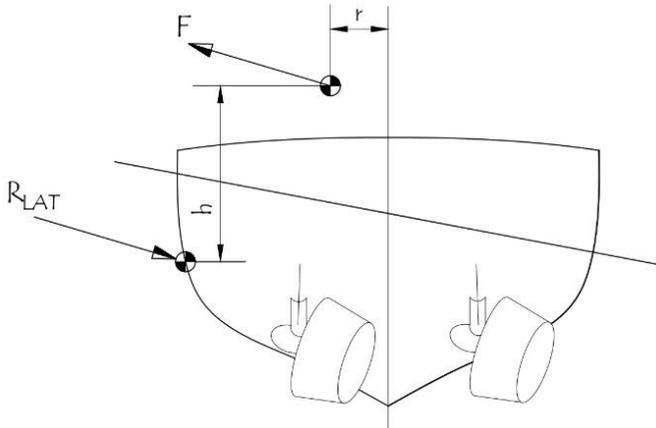


Fig. 17 - Diagrama de fuerzas durante operaciones de remolque portuario

## Criterios de Estabilidad

En 1939 el Ingeniero Naval Jaakko Rahola (Finlandia), a partir de los resultados de un estudio estadístico sobre una muestra de 34 buques perdidos por falta de estabilidad, sugiere un criterio que incluye varios aspectos relacionados con la estabilidad.

Estos criterios fueron utilizados como base para la determinación, por parte de la IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization), precursora de la actual OMI, de los primeros criterios para la estabilidad intacta en 1968.

### Criterio de Rahola

Rahola, a partir de sus estudios, entiende que la estabilidad debe ser evaluada de acuerdo con la magnitud de los brazos de adrizamiento como también en aspectos que tienen que ver con la estabilidad dinámica.

Los límites inferiores en los brazos de adrizamiento fueron definidos de acuerdo con el siguiente detalle:  $GZ > 140 \text{ mm}$  para un ángulo de escora  $\theta = 20^\circ$ ;  $GZ > 200 \text{ mm}$  para un ángulo de escora  $\theta = 30^\circ$ ;  $GZ > 200 \text{ mm}$  para un ángulo de escora  $\theta = 40^\circ$ .

Esto establecía intrínsecamente que la curva de brazos adrizantes debería tener su máximo en el rango angular entre  $30^\circ$  y  $40^\circ$ .

Por último, el valor de la estabilidad dinámica para  $40^\circ$  o el ángulo de inundación si éste fuera menor, debería ser como mínimo  $80 \text{ mm/radián}$ .

### **Criterios recomendados por OMI (IMCO)**

Las siguientes recomendaciones principales han sido aprobadas por IMCO en 1968, transformándose en una parte sustancial de los criterios de estabilidad intacta aplicables a buques cuyas esloras sean mayores de  $24 \text{ m}$ .

Los tipos de buques que están incluidos en esta reglamentación son detallados e incluyen: buques de carga; buques de carga que transporten cubiertas de madera; buques de pasaje; buques pesqueros; buques para fines especiales; buques de suministro mar adentro; unidades móviles de perforación mar adentro; buques de carga que transporten contenedores en cubierta y buques portacontenedores.

### **Criterios de estabilidad generales**

En relación con la curva de brazos adrizantes, los criterios definen lo siguiente:

2.2.1 El área bajo la curva de brazos adrizantes no será inferior a  $55 \text{ mm.radián}$  hasta un ángulo de escora igual a  $30^\circ$ ; tampoco será inferior a  $90 \text{ mm.radián}$  hasta un ángulo de escora igual a  $40^\circ$  o hasta  $\theta_f$  (ángulo de inundación descendente) si éste fuera inferior; adicionalmente su valor no será inferior a  $30 \text{ mm.radián}$  entre los ángulos de escora de  $30^\circ$  y  $40^\circ$ , o entre  $30^\circ$  y  $\theta_f$  si éste fuera inferior a  $40^\circ$ .

2.2.2 El brazo de adrizamiento será como mínimo de  $200 \text{ mm}$  para un ángulo de escora igual o superior a  $30^\circ$ .

2.2.3 El brazo de adrizamiento máximo corresponderá a un ángulo de escora no inferior a  $25^\circ$ . Si esto no es posible, podrán aplicarse, a reserva de lo que apruebe la Administración, criterios basados en un nivel de seguridad equivalente (definidos oportunamente por la norma).

2.2.4 La altura metacéntrica inicial  $GM_{T0}$  no será inferior a  $150 \text{ mm}$ .

Una excepción al valor definido como criterio en 2.2.4 corresponde a la altura metacéntrica para buques pesqueros, la que no deberá ser inferior a  $350 \text{ mm}$  de acuerdo con lo establecido por el Convenio Internacional de Torremolinos en 1977.

Adicionalmente otros criterios son definidos para evaluar la estabilidad, los cuales incluyen factores dinámicos actuando sobre el buque, a diferencia de los ya señalados que consideran un estado de situación cuasi estático.

### **Criterio de viento y balance intensos: criterio meteorológico (2.3)**

Este criterio evalúa la estabilidad dinámica o reserva de estabilidad que mantiene el buque cuando actúan en forma combinada viento de través, combinados y arrachados.

En acciones sucesivas, se someterá el buque a la presión de un viento constante actuando perpendicular al plano de crujía, generando un momento escorante cuyo brazo definimos como  $I_{w1}$ , el cual provoca una escora permanente cuyo ángulo será  $\theta_0$ ; se considera entonces el balanceo producido por el oleaje, que genera una escora  $\theta_1$  hacia barlovento; en ese punto un viento arrachado  $I_{w2} = 1.5 \cdot I_{w1}$  alcanza el través provocando una nueva escora a sotavento, alcanzando una nueva posición angular en  $\theta_2$ .

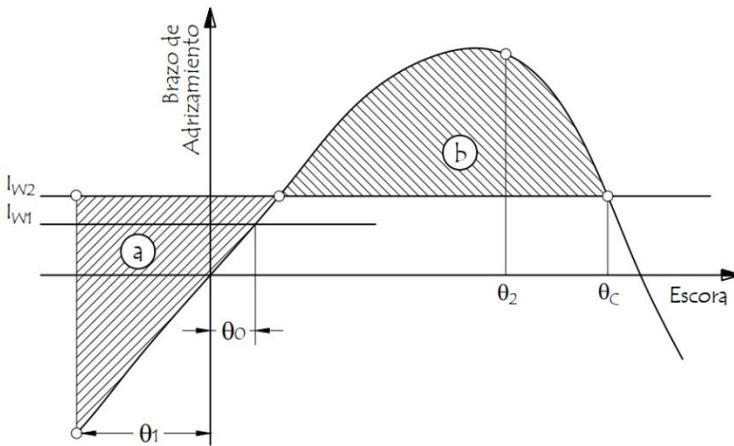


Fig. 18 - Criterio meteorológico

Al analizar la energía suministrada en la última etapa desde la posición a barlovento hasta la posición final a sotavento y la energía acumulada derivada de la acción del brazo de adrizamiento hasta el ángulo final, podemos visualizar dos áreas diferenciales, siendo a la correspondiente a la energía remanente de escora y b la correspondiente a la energía remanente de adrizamiento o restauración. El balance de estas energías remanentes define la capacidad del buque para sostener las acciones externas definidas anteriormente, siendo entonces  $b/a > 1$  la condición necesaria para cumplir con este criterio.

Los brazos de momentos escorantes para viento constante y arrachado se calcularán, de acuerdo con la formulación establecida en la ecuación 12:

$$I_{w1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot g \cdot \Delta}; I_{w2} = 1.5 \cdot I_{w1} \quad [27.]$$

Los valores de los distintos parámetros que definen el procedimiento están tabulados y desarrollados a los efectos de su ubicación en la gráfica de brazos de adrizamiento y posterior cálculo de las energías remanentes a y b.

### **Criterios de estabilidad específicos**

#### **Criterio para buques de pasaje (3.1)**

##### **Criterio de pasaje a una banda (3.1.1)**

Los buques de pasaje, además de cumplir con los criterios definidos en 2.2.1 a 2.2.4 y 2.3, deberán asegurar que la escora producida por la traslación de pasajeros a una banda no excederá los 10°.

El momento generado por dicho movimiento puede calcularse como:

$$M_{pax} = N \cdot 0.075 \cdot d \quad [28.]$$

donde

*N* es el número de pasajeros que se desplazan hacia la banda

*0.075* es el peso normalizado por pasajero, *ton*

*d* es la distancia que se trasladan los pasajeros, *m*

##### **Criterio por maniobra de viraje (3.1.2)**

El ángulo de escora debido a una maniobra de giro o viraje no deberá exceder los 10°. El momento de escora se calculará de acuerdo a la siguiente formulación:

$$M_{Turn} = 0.200 \cdot \frac{v_0^2}{LWL} \cdot \Delta \cdot \left( KG - \frac{d}{2} \right) \cdot [29.]$$

donde

*v<sub>0</sub>* es la velocidad de avance del buque, *m/s*

*LWL* es la eslora en la flotación, *m*

*Δ* es el desplazamiento del buque, *ton*

*KG* es la posición vertical del centro de gravedad sobre el plano base, *m*

*d* es el calado medio, *m*

#### **Criterio para petroleros cuyo peso muerto iguala o supera las 5000 ton (3.2)**

Estos deberán cumplir con las indicaciones dispuestas en la regla 27 del Anexo I del MARPOL 73/78, las cuales se detallan a continuación:

- a) En puerto, la altura metacéntrica inicial *GM<sub>0</sub>*, corregida por superficies libres para un ángulo de escora de 0°, no será inferior a 150 mm.
- b) En navegación, se mantienen los criterios generales, con la diferencia que

el brazo de adrizamiento máximo corresponderá a un ángulo de escora preferiblemente superior a  $30^\circ$  pero no inferior a  $25^\circ$ .

### **Criterio para transporte de cubertadas de madera (3.3)**

Los buques de carga que transporten cubertadas de madera deberán cumplir la prescripciones generales definidas en 2.2 y 2.3, pero podrá aplicarse un criterio alternativo a satisfacción de la Administración.

#### **Criterios de estabilidad alternativos para cubertadas de madera (3.3.2)**

En los buques que transporten cubertadas de madera, y siempre que la cubertada se extienda longitudinalmente entre las superestructuras y transversalmente a todo lo ancho de la manga del buque, con excepción de la anchura de un trancanil alomado que no exceda del 4 % de la manga, teniendo un trincado efectivo de la carga, se podrán considerar los siguientes criterios:

3.3.2.1 El área bajo la curva de brazos adrizantes no será inferior a  $80 \text{ mm.radianes}$  hasta un ángulo de escora de  $40^\circ$  o hasta el ángulo de inundación descendente, si éste fuera inferior.

3.3.2.2 El valor máximo del brazo adrizante será como mínimo  $250 \text{ mm}$ .

3.3.2.3 Durante todo el viaje, la altura metacéntrica GM no será inferior a  $100 \text{ mm}$ , teniendo en cuenta la absorción de agua por la carga de cubierta y/o la acumulación de hielo en las superficies a la intemperie (engelamiento)

3.3.2.4 Se establece una cierta relajación en la aplicación del criterio meteorológico.

### **Criterio para transporte de carga a granel (3.4)**

Los buques de carga que transporten grano a granel deberán cumplir con lo establecido en la resolución MSC.23 (59) Código internacional para el transporte seguro de grano en modalidad a granel. (adoptada el 23 Mayo 1991).

- i) El ángulo de escora producido por el traslado de grano de una banda hacia la otra no deberá ser mayor que  $12^\circ$ ;
- ii) La estabilidad dinámica residual, diferencia entre la acumulada por efecto de la acción del brazo de adrizamiento y la correspondiente al brazo de escora producido por el traslado del granel, medida entre el ángulo de escora permanente y un ángulo de  $40^\circ$  o el ángulo de inundación, si fuera menor, no deberá ser menor que  $75 \text{ mm.radianes}$ ;
- iii) La altura metacéntrica inicial corregida por superficies libres no será menor que  $300 \text{ mm}$ .

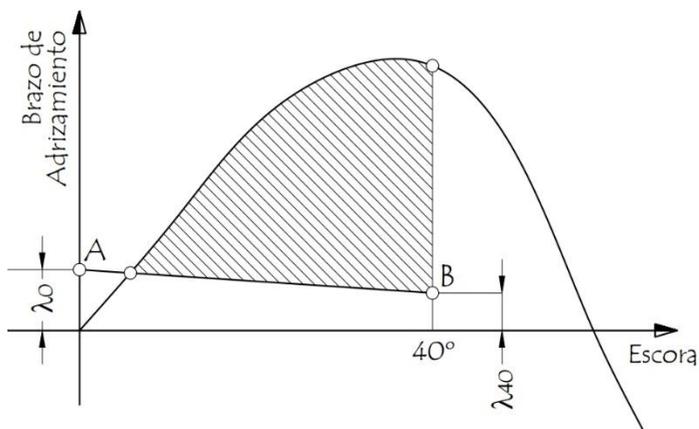


Fig. 19 - Criterio de estabilidad para buques con carga a granel

El criterio establece asimismo la manera en que debe ser considerado el traslado del grano de una banda a la otra; en los casos en que la bodega está completamente llena y el buque trimado, el ángulo de la cuña de corrimiento del granel se considerará  $15^\circ$ , mientras que ese ángulo será  $25^\circ$  si la bodega no está completa; casos particulares se consideran como combinaciones lineales de ambas situaciones.

### Naves de gran velocidad (3.5)

Las naves de gran velocidad deberán cumplir con los requisitos definidos en la Resolución MSC.36 (63)) para embarcaciones construidas entre 1996 y 2002 [International Code of Safety for High Speed Craft, 1994 Resolution MSC.36 (63)], mientras que luego de esa fecha será de aplicación la Resolución MSC.97 (73) [International Code of Safety for High Speed Craft, 2000].

Se establecen criterios de estabilidad diferenciales en relación con el tipo de embarcación considerada, ya sea tipo hidroala (Hydrofoil Craft), multicasco o monocasco.

### Remolcadores y AHTS<sup>1</sup>

Analizando las normas establecidas en el Código de Estabilidad Estática 2008, sorprende la falta de un criterio específico aplicado a remolcadores, haciéndose extensiva para estos buques la norma general establecida en 2.2 y 2.3. En forma

<sup>1</sup> Anchor Handling Tug and Supply (Servicio de manejo de anclas)

alternativa, el criterio en Parte B, 2.4.5 aplicable a buques de suministro aguas afuera podría ser utilizado para remolcadores de altura en caso que su diseño y características constructivas tuvieran similitudes con los primeros.

Este es un aspecto relativamente sorprendente, que podría ser explicado por las características relacionadas con los remolcadores de puerto: operan mayoritariamente en aguas del Estado Ribereño y tienen dimensiones, tanto en su eslora como en su peso muerto, que naturalmente los alejan del alcance de las regulaciones internacionales. En su lugar, las autoridades marítimas de la bandera y las propias Sociedades de Clasificación han desarrollado normas, lamentablemente sin una uniformización con alcance internacional.

Esto ha sido reconocido por la industria asociada al remolque, lo que ha llevado a la realización de esfuerzos por generar normas únicas. En 2006 aparece una primera propuesta de armonización de reglas relacionadas con remolcadores (*Allan RG, A Proposal for Harmonised International Regulations for the Design and Construction of Tugboats, ITS2006, Rotterdam*) y en 2010 Bureau Veritas presenta una serie de líneas estratégicas para desarrollar esta normativa común (*De Jong G, The Class Answer to the Rapidly Developing Tug Industry, ITS2010, Vancouver*), lo que derivó en una reglamentación específica para remolcadores contenida en la NI 617 Guía para el diseño, construcción y operación de Remolcadores (*De Jong G, New Regulations for Towing and Anchor Handling Vessels: the Future is Now, ITS2014, Hamburg*).

Por su parte, IMO plantea la necesidad de establecer normativas específicas, fundamentalmente a partir de la pérdida del remolcador Bourbon Dolphin en 2007. El Subcomité de Estabilidad y Líneas de Carga y Seguridad de Buques de Pesca (*Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety - SLF*), en conjunto con el Subcomité de Diseño y Equipamiento (*Ship Design and Construction - SDC*) fue instruido en la tarea de establecer un cambio en las normas de estabilidad de 2008, incluyendo en la Parte B un subcapítulo especial dedicado a buques remolcadores, tanto en la modalidad de empuje portuario como escolta.

En la 55ª Sesión de este Subcomité en 2013 se estableció la necesidad de continuar con la revisión del Código de Estabilidad IS 2008 en relación con los criterios para remolque y manejo de anclas, a través de su inclusión específica en la Parte B (*Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety (SLF): 55th session, 18 to 22 February 2013*), lo cual finalmente deriva en la resolución MSC 415 (97) adoptada el 25 de noviembre de 2016, *Enmiendas a la Parte B del Código internacional de estabilidad sin avería, 2008 (IS 2008)*.

Estas normas o *Criterios Armonizados* introducidos en el Código de Estabilidad no son obligatorias sino recomendaciones, siendo esperable que, una vez completado su ciclo de cuatro años, la OMI los incorpore oficialmente a partir de 2020. Se presentan a continuación los criterios de estabilidad incluidos en el Código IS 2008 según la

citada resolución.

### **Buques para la maniobra de anclas (2.7)**

Los buques utilizados para la maniobra de anclas, denominados AHTS, deberán cumplir con los criterios generales en condiciones de navegación. Durante las operaciones de cobrado de anclas, bajo la acción del momento escorante  $I_{ANCHOR}$  producido por dicha acción, se deberán cumplir los siguientes límites:

- i) La estabilidad dinámica residual, diferencia entre la acumulada por efecto de la acción del brazo de adrizamiento y la correspondiente al brazo de escora producido por el cobrado del ancla, medida entre las intersecciones de las curvas de los brazos de adrizamiento y escora o el ángulo de inundación, si fuera menor, no deberá ser menor que  $70 \text{ mm.radianes}$ ;
- ii) El brazo de adrizamiento residual no será menor a los  $200 \text{ mm}$ ;
- iii) El ángulo de escora permanente para la primera intersección de las curvas de los brazos de adrizamiento y escora no deberá ser mayor que el ángulo al cual el brazo de adrizamiento alcanza el 50 % de su valor máximo o el ángulo de inmersión al borde del trancanil, cualquiera sea el menor de los dos.

### **Buques remolcadores (2.8)**

Se establecen diferencias en cuanto a las operaciones realizadas, sean estas de remolque portuario o de escolta, sin perjuicio de lo cual todos deben cumplir con los criterios generales para condiciones de navegación libre. En ambos casos el criterio diferencial se relaciona con el balance de energía residual entre la correspondiente a la generada por el momento de adrizamiento y la acumulada por el momento de escora.

Para los servicios de remolque portuario, el área A definida por la superficie entre las curvas de brazos de adrizamiento y brazos de escora, entre el ángulo de escora permanente correspondiente a la primera intersección de ambas curvas, y el segundo ángulo de intersección de éstas o el ángulo de inundación, cualquiera fuera el menor, deberá ser mayor que el área B definida de manera análoga, entre la posición del buque adrizado,  $\theta = 0$  y el ángulo de escora permanente.

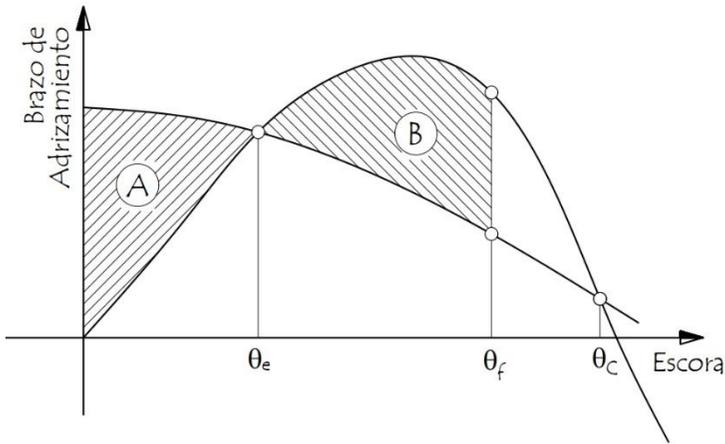


Fig. 20 - Criterio de estabilidad para remolque portuario

Adicionalmente, se deberá cumplir que el ángulo de escora permanente debe ser menor que el ángulo de inundación.

Para los servicios de remolque de escolta, se deberán cumplir las siguientes relaciones:

- i)  $\text{Área A} \geq 1.25 \times \text{Área B}$
- ii)  $\text{Área C} \geq 1.40 \times \text{Área D}$
- iii) El ángulo de escora permanente no deberá ser mayor que  $15^\circ$

donde:

*Área A* es el área debajo de la curva de brazos adrizantes entre el ángulo de escora permanente y un ángulo de  $20^\circ$

*Área B* es el área debajo de la curva de brazos escorantes entre el ángulo de escora permanente y un ángulo de  $20^\circ$

*Área C* es el área debajo de la curva de brazos adrizantes hasta el ángulo de la segunda intersección de las curvas o el ángulo de inundación, cualquiera fuera el menor

*Área D* es el área debajo de la curva de brazos escorantes hasta el ángulo de la segunda intersección de las curvas o el ángulo de inundación, cualquiera fuera el menor

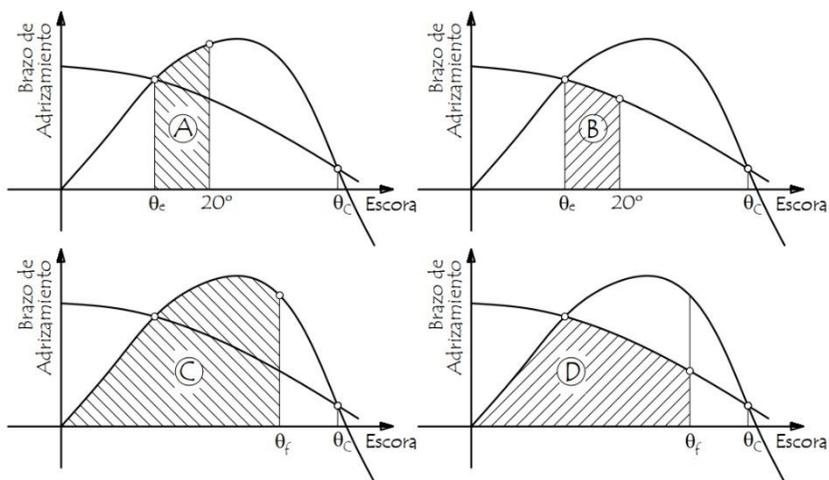


Fig. 21 - Criterio de estabilidad para remolque escolta

IMO MSC 97/22, Report of the Maritime Safety Committee on its Ninety-Seventh Session, 2 December 2016

Operation and Handling in Escort Tugboat Manoeuvres with the aid of Automatic Towing Winch Systems Luis Carral Couce<sup>1</sup>, Juan Carlos Carral Couce<sup>2</sup> and José Ángel Fraguera Formoso<sup>1</sup> <sup>1</sup> (Coruña University, Spain) <sup>2</sup> (Doctorate Program, Coruña University, Spain) (E-mail: l.carral@udc.es)

RESOLUCIÓN MSC.267(85) Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008 (Código IS 2008)

Rahola, J.; "The Judging of the Stability of Ships", Helsinki, 1939

Ruponen, P.; Rahola criterion revisited: an overview of Jaakko Rahola's research and career; Proceedings of the 17th International Ship Stability Workshop, Helsinki, Finland; Aalto University, School of Engineering, Marine Technology, Finlandia, 2019

Bureau Veritas; "Rules for the Classification of Naval Ships NR 483"; 2017

Part B - Hull and Stability; Pt B, Ch 3, Sec 2 Intact Stability; Pt B, Ch 3, App 5

ANEXO 7 RESOLUCIÓN MSC.415(97) (adoptada el 25 de noviembre de 2016)  
ENMIENDAS A LA PARTE B DEL CÓDIGO INTERNACIONAL DE

ESTABILIDAD SIN AVERÍA, 2008 (CÓDIGO IS2008)

ANNEX 2 RESOLUTION MSC.267(85) (adopted on 4 December 2008)  
ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE ON INTACT STABILITY, 2008  
(2008 IS CODE)

Herd, R. J.; “Rahola – 40 years on”; Royal Institution of Naval Architects (RINA),  
Australian Branch; 1979

Lehmann, Ch. H.; “Geometría Analítica”; Editorial Limusa; 1989

Francescutto, A.; "Intact stability criteria of ships – Past, present and future";  
Editorial Elsevier; Ocean Engineering, vol. 120, pp. 312-317, July 2016.

“Formulating Stability Requirements For Anchor Handling Tug And Supply  
(AHTS) Vessels” Dephne, Ch. W. P.; Chatterjea, K.; Hanks, K.; Dev, A.; Tam, I.;  
Conference paper, 2013.

<https://www.researchgate.net/publication/268455676> [accessed Apr 26 2021].

De Jong, G.; “New Regulations For Towing And Anchor Handling Vessels:The  
Future Is Now”; 23rd. International Tug, Salvage & OSV Convention and  
Exhibition; Bureau Veritas, France; 2014

Bureau Veritas; “*Rules for the Classification of Naval Ships NR 483*”; 2017  
Part B - Hull and Stability; Pt B, Ch 3, Sec 2 Intact Stability; Pt B, Ch 3, App 5

(de Jong, 2017)