

EJERCICIO DE ESTABILIDAD EN REMOLCADORES

Los parámetros que se relacionan con la estabilidad en los buques son: la **altura metacéntrica (GM)** y el **brazo adrizante (GZ)**.

$$GM = KM - KG$$

G_{Mo} = altura metacéntrica inicial

$$GZ = G_{Mo} \cdot \sin\theta$$

El **brazo adrizante (GZ)** es el parámetro más importante de la estabilidad pues representa el valor de la separación del par de fuerzas que va a adrizar al buque, en el instante que desaparezca el momento escorante.

Para la obtención del brazo GZ utilizamos la siguiente fórmula:

$$GZ_{\theta} = KN_{\theta} - KG_c \cdot \sin\theta - |L_c \cdot G| \cos\theta$$

De la documentación del barco obtenemos los distintos valores de KN para cada escora en función del calado o del desplazamiento (pantocarenas)

MOMENTOS ESCORANTES

Los agentes externos (mar y viento), las líneas de remolque e incluso efectos propios como la metida del timón, son capaces de generar un momento escorante que escorará el buque hasta un determinado ángulo.

Nos centraremos en dos momentos escorantes relacionados con los trabajos de remolque, que son:

- El momento escorante debido al arrastre del remolcador por parte del remolcado (Momento de arrastre).
- El momento escorante debido al tiro del remolcador (Momento de tiro).

Momento de arrastre (M1) -Tow Tripping-

Como consecuencia de la inercia del buque remolcado o por efecto de agentes externos (viento, etc...), puede producirse un cambio de sentido en la aplicación de la fuerza en la línea de remolque, con lo que el remolcador pasa a ser el remolcado.

Existen varios elementos de maniobra que intentan reducir los efectos transversales de este momento, por ejemplo, obligando por medio de pines, retenidas o contras a que la línea de remolque trabaje desde un lugar distante del centro del remolcador, que sería el lugar más peligroso. Con este sistema se consigue que el efecto se reduzca a que el remolcador cambie de rumbo, poniéndose en línea con el calabrote que le une al remolcado y que ahora tira de él.

El valor del momento es el siguiente:

$$M^1 = (1/19,6)*C1*C2 \gamma *V^2*Ap(h\cos\theta + C3Cm - r\sin\theta)$$

Siendo:

C1 = Coeficiente de tracción lateral -drag coefficient-.

C2 = Corrección de C1 por el ángulo de escora.

C3 = Distancia del centro de presión del área Ap a la flotación, expresada como fracción del calado medio real.

γ = Peso específico del agua (Tns/m³).

V = Velocidad lateral del buque remolcador (2,57 m/seg \square 5 nudos).

Ap = Área de la proyección sobre el plano diametral de la parte sumergida del remolcador, en metros cuadrados.

h = Altura del gancho de remolque sobre la flotación, en metros.

θ = Escora.

r = radio del gancho de remolque.

Cm = Calado medio (completo) en la maestra.

Los cálculos se disponen de la siguiente manera:

- En un principio se hace necesario calcular los parámetros que van a ser los argumentos con los que se entrará en los escalas de los coeficientes.

Argumento de C1: Relación entre la distancia del gancho a la popa con la eslora en la flotación.

En remolcador "Cathorce" para un calado medio de 4,60 metros: eslora en la flotación = 29,43 metros.

$$\text{Arg} = (\text{dist gancho} - \text{pp})/\text{Ef} = 10,37/29,43 = 0,352 \quad C1 = 0,79$$

Argumento de C2 y de C3: Relación entre el ángulo que se estudia (rango de la curva de estabilidad) y el ángulo para la inmersión del borde de la cubierta en la sección media. Los argumentos serán tantos como ángulos que se estudien p.e. de 0° a 80° de 10° en 10°

Remolcador "Cathorce" con un calado medio de 4,60 metros, el ángulo de inmersión de la cubierta es: 12,57°

| Angulo de escora | Angulo/ang, inm | C2 | C3 |
|------------------|-----------------|-------|-------|
| 0° | 0,000 | 1,000 | 0,500 |
| 10° | 0,865 | 1,000 | 0,541 |
| 20° | 1,729 | 1,096 | 0,780 |
| 30° | 2,594 | 1,374 | 0,840 |
| 40° | 3,458 | 1,650 | 0,840 |
| 50° | 4,323 | 1,926 | 0,840 |
| 60° | 5,188 | 2,202 | 0,840 |
| 70° | 6,052 | 2,478 | 0,840 |
| 80° | 6,917 | 2,754 | 0,840 |

- En segundo lugar, una vez conocidos los coeficientes y el resto de parámetros, se calculan los momentos escorantes para cada ángulo de escora.

h se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$h = kgbita - Cm$$

Ap es el producto del calado medio completo (calado sobre la línea base + espesor de la quilla) en la sección media por la eslora entre perpendiculares

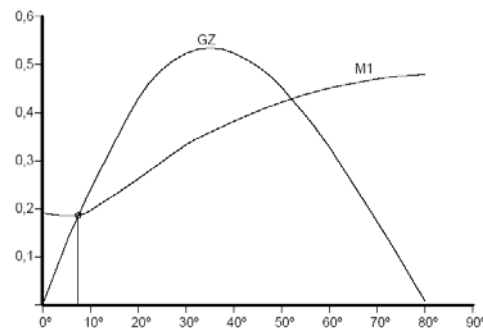
$$V = 2,57 \text{ con lo que } V2 = 6,605$$

$$\gamma = 1,025$$

Una vez que se tienen los momentos escorantes correspondientes a las distintas escoras se dividirá por el desplazamiento para obtener el brazo escorante, que es el que se representará en la gráfica donde se tiene representada a su vez la curva de estabilidad.

El corte de la curva de estabilidad estática con la que se acaba de calcular y representar dará el ángulo de equilibrio estático por arrastre del remolcador que siempre deberá existir y su valor será inferior al ángulo de inundación progresiva a través de aberturas o a la zozobra del remolcador

Representación:



Que corresponde a los siguientes valores:

| Ángulo | GZ | Ángulo/Inm | C3 | Cm.C3 | h.cos θ | r.sen θ | Suma | C1 | C2 | Mto 1 | Brazo |
|--------|-------|------------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 0 ° | 0,000 | 0,000 | 0,500 | 2,296 | 1,988 | 0,000 | 4,284 | 0,786 | 1,000 | 143,140 | 0,191 |
| 10 ° | 0,240 | 0,865 | 0,541 | 2,484 | 1,958 | 0,053 | 4,389 | 0,786 | 1,000 | 146,652 | 0,196 |
| 20 ° | 0,429 | 1,729 | 0,780 | 3,582 | 1,868 | 0,104 | 5,346 | 0,786 | 1,096 | 195,756 | 0,261 |
| 30 ° | 0,523 | 2,594 | 0,840 | 3,857 | 1,722 | 0,153 | 5,426 | 0,786 | 1,374 | 249,123 | 0,333 |
| 40 ° | 0,524 | 3,458 | 0,840 | 3,857 | 1,523 | 0,196 | 5,184 | 0,786 | 1,650 | 285,806 | 0,382 |
| 50 ° | 0,543 | 4,323 | 0,840 | 3,857 | 1,278 | 0,234 | 4,901 | 0,786 | 1,926 | 315,426 | 0,421 |
| 60 ° | 0,328 | 5,188 | 0,840 | 3,857 | 0,994 | 0,264 | 4,587 | 0,786 | 2,202 | 337,498 | 0,451 |
| 70 ° | 0,173 | 6,052 | 0,840 | 3,857 | 0,680 | 0,287 | 4,251 | 0,786 | 2,478 | 351,937 | 0,470 |
| 80 ° | 0,007 | 6,917 | 0,840 | 3,857 | 0,345 | 0,300 | 3,902 | 0,786 | 2,754 | 359,068 | 0,479 |

Parámetros:

Eslora en la flotación = 29,43 metros.

Altura del gancho sobre la flotación = 1,988 metros.

Calado medio completo en la maestra = 4,592 metros.
 Distancia del gancho a la popa = 10,37 metros.
 Ángulo de inmersión de la cubierta en la maestra = 11,566°
 Radio del gancho = 0,305 metros (pequeño, se instaló uno mayor).
 Desplazamiento = 748,88 toneladas métricas.

El corte se produce a una escora de 7,5° que es claramente inferior al ángulo de inundación progresiva que para el desplazamiento de esta condición es de 65,5°

Momento de Tiro (M2) -Self Tripping

Este momento se genera por la acción de los propulsores al aplicarse plena potencia

$$M_2 = C_4 \cdot C_5 \cdot T \cdot (h \cdot \cos \theta + C_6 \cdot C_m - r \cdot \text{sen} \theta)$$

$$M_2 = 0,70 \cdot C_5 \cdot T \cdot (h \cdot \cos \theta + 0,52 \cdot C_m - r \cdot \text{sen} \theta)$$

Siendo:

C4: Fracción (del tiro máximo a punto fijo) del remolcador que se puede suponer actúa transversalmente. Siempre $C_4 = 0,70$

C5: Corrección de C4 por la posición longitudinal del gancho de remolque.

T: Tiro máximo a punto fijo del remolcador -Bollard Pull- (en toneladas métricas).

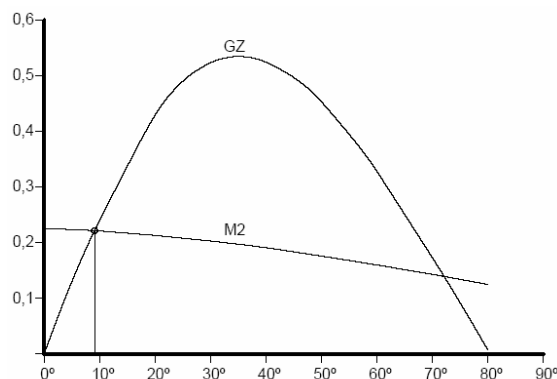
C6: Distancia a la flotación del centro de resistencia efectivo, como fracción del calado. Siempre $C_6 = 0,52$

h, C_m , θ y r: como en M1

C5: La transmisión transversal del tiro se verá claramente afectada por la posición longitudinal del gancho del remolque, anulándose al estar en la misma popa.

Reduccion en el momento escorante efectivo-posicion longitudinal del gancho de remolque.

Representación:



Los cálculos se disponen de la siguiente manera:

| Ángulo | GZ | $h \cdot \cos \theta$ | 0,52.Cm | $r \cdot \sin \theta$ | Suma | C5 | Mto | Brazo esc |
|--------|-------|-----------------------|---------|-----------------------|-------|----|---------|-----------|
| 0 ° | 0,000 | 1,988 | 2,388 | 0,000 | 4,376 | 1 | 168,470 | 0,225 |
| 10 ° | 0,240 | 1,958 | 2,388 | 0,053 | 4,293 | 1 | 165,268 | 0,221 |
| 20 ° | 0,429 | 1,868 | 2,388 | 0,104 | 4,152 | 1 | 159,838 | 0,213 |
| 30 ° | 0,523 | 1,722 | 2,388 | 0,153 | 3,957 | 1 | 152,344 | 0,203 |
| 40 ° | 0,524 | 1,523 | 2,388 | 0,196 | 3,715 | 1 | 143,015 | 0,191 |
| 50 ° | 0,543 | 1,278 | 2,388 | 0,234 | 3,432 | 1 | 132,134 | 0,176 |
| 60 ° | 0,328 | 0,994 | 2,388 | 0,264 | 3,118 | 1 | 120,032 | 0,160 |
| 70 ° | 0,173 | 0,680 | 2,388 | 0,287 | 2,781 | 1 | 107,075 | 0,143 |
| 80 ° | 0,007 | 0,345 | 2,388 | 0,300 | 2,433 | 1 | 93,658 | 0,125 |

Para este ejemplo se ha considerado un tito de 55 toneladas métricas y los mismos parámetros que para el cálculo de M1

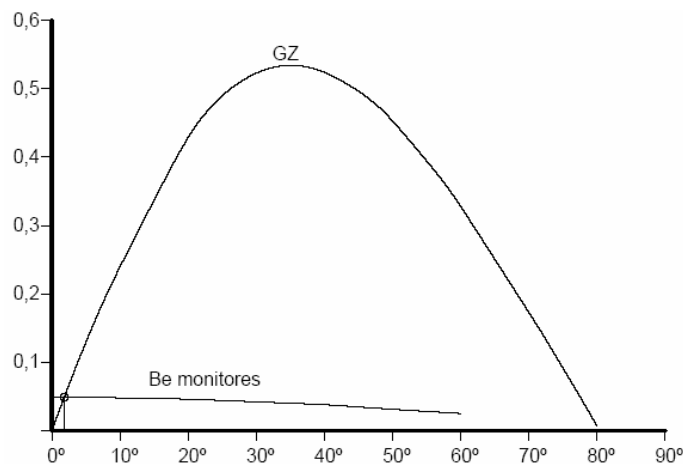
Momento escorante en el remolque de escolta (Escort)

Los remolcadores pueden trabajar de distintas maneras, pero básicamente lo hacen con dos tipos de tiro: el tiro directo y el tiro indirecto. Para poder trabajar con el tiro indirecto es necesario que el remolcador sea un remolcador de escolta y para ello debe estar preparado para soportar las fuerzas hidrodinámicas que se generan.

Momento de empuje transversal (p.e. monitores Fi-Fi 1)

Dada la enorme capacidad de las bombas de contraincendios que se instalan en los buques remolcadores y la altura a la que se disponen los monitores que expulsan el agua, se hace necesario calcular el momento escorante que generan. Estos monitores están diseñados para lanzar el agua que manda la bomba a una distancia muy grande para asistir a un buque o instalación que lo necesite, siendo el caso más previsible el de socorrer a un buque incendiado.

Representación:



El cálculo es sencillo:

| Ángulo | GZ | Brazo .cos θ | Reacción | Mto esc | Brazo |
|--------|-------|--------------|----------|---------|-------|
| 0 ° | 0,000 | 13,01 | 2,84 | 36,948 | 0,049 |
| 10 ° | 0,240 | 12,81 | 2,84 | 36,387 | 0,049 |
| 20 ° | 0,429 | 12,23 | 2,84 | 34,720 | 0,046 |
| 30 ° | 0,523 | 11,27 | 2,84 | 31,998 | 0,043 |
| 40 ° | 0,524 | 9,97 | 2,84 | 28,304 | 0,038 |
| 50 ° | 0,543 | 8,36 | 2,84 | 23,750 | 0,032 |
| 60 ° | 0,328 | 6,51 | 2,84 | 18,474 | 0,025 |
| 70 ° | 0,173 | 4,45 | 2,84 | 12,637 | 0,017 |
| 80 ° | 0,007 | 2,26 | 2,84 | 6,416 | 0,009 |

Otros momentos escorantes.

Solamente mencionaremos otros momentos escorantes que será necesario tener en cuenta, de los cuales existe reglamentación nacional e internacional.

- Momento escorante por los efectos del viento y balance intensos.
- Momento escorante por los efectos del agua embarcada en cubierta.
- Momento escorante por la acumulación de hielo.

CORECCIONES AL GZ

Corrección al GZ por superficies libres.

Los líquidos en los tanques que están parcialmente llenos, generan un efecto de pérdida de estabilidad. La posición vertical del centro de gravedad del buque se mueve proporcionalmente –y en subida virtual- al momento de inercia de la superficie libre del tanque, también proporcionalmente al peso específico del líquido en el contenido y en una medida inversamente proporcional al desplazamiento del buque. En el caso de haber varios tanques parcialmente llenos, se obtendrá un sumatorio, con los productos de cada momento de inercia por el peso específico correspondiente que luego se dividirá por el desplazamiento.

Entre otros motivos, la corrección por superficies libres, que se va a calcular seguidamente, es más exacta porque tiene en cuenta la forma de los tanques en cuanto a que, en función de las proporciones del tanque se podrá conocer a que escora llega el líquido al techo o fondo del mismo, pudiéndose aplicar una corrección más atinada.

Se trata de calcular los momentos escorantes de los tanques para las distintas escoras y aplicar su efecto directamente al brazo GZ una vez que se ha dividido por el desplazamiento.

El momento escorante se calcula según la fórmula:

$$M_{SL} = V . b . \gamma . k . \sqrt{\delta}$$

Siendo:

MSL: Momento escorante por superficies libres.

V: Capacidad total del tanque, en metros cúbicos.

b: dimensión máxima del tanque en dirección de la manga, en metros.

γ : Peso específico del líquido contenido en el tanque, en toneladas métricas/m³.

k: coeficiente adimensional que se obtiene por tabla, según la relación b/h. Los valores intermedios se determinan por interpolación lineal.

δ : coeficiente de bloque del tanque = $V / (b.l.h)$

l: dimensión máxima del tanque en dirección de la eslora, en metros.

h: altura máxima del tanque, en metros.

De la tabla nº 1 obtenemos los diferentes valores de k para cada escora y con ellos se calculan los distintos valores de MSL para cada escora y tanque. Finalmente se suman los distintos momentos de cada escora y se dividirá por el desplazamiento.

Se comprueba que el MSL para 30° de escora es menor de:

0,01 x Desplazamiento mínimo

Escora

| b/h | 5° | 10° | 15° | 20° | 30° | 40° | b/h |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 20 |
| 10 | 0,07 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 10 |
| 5 | 0,04 | 0,07 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 5 |
| 3 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,11 | 3 |
| 2 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 2 |
| 1,5 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 1,5 |
| 1 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 1 |
| 0,75 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,75 |
| 0,5 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,5 |
| 0,3 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,3 |
| 0,2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,2 |
| 0,1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,1 |

b/h: Relación manga / puntal

| b/h | 45° | 50° | 60° | 70° | 75° | 80° | 90° | b/h |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 20 |
| 10 | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 10 |
| 5 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 5 |
| 3 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,04 | 3 |
| 2 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 2 |
| 1,5 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 1,5 |
| 1 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 1 |
| 0,75 | 0,07 | 0,08 | 0,12 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,75 |
| 0,5 | 0,04 | 0,05 | 0,09 | 0,16 | 0,18 | 0,21 | 0,25 | 0,5 |
| 0,3 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,11 | 0,19 | 0,27 | 0,42 | 0,3 |
| 0,2 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,13 | 0,27 | 0,63 | 0,2 |
| 0,1 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,14 | 1,25 | 0,1 |

Ejemplo de cálculo:

En primer lugar se determina el momento escorante para un valor de $K = 1$

| | Eslora | Manga | Puntal | Volumen | Peso esp. | $\sqrt{\delta}$ | Mto esc $K = 1$ | x 2 |
|----------|--------|-------|--------|---------|-----------|-----------------|-----------------|---------|
| Tanque 1 | 5,50 | 4,64 | 3,80 | 56,91 | 0,85 | 0,7661 | 171,944 | 343,888 |
| Tanque 2 | 8,00 | 4,92 | 2,60 | 32,86 | 0,85 | 0,5667 | 77,8702 | |
| Tanque 3 | 8,00 | 4,92 | 2,60 | 29,03 | 0,85 | 0,5326 | 64,6607 | |
| Tanque 4 | 3,00 | 4,92 | 6,55 | 27,12 | 1,00 | 0,5296 | 70,6623 | 141,325 |

En la última columna se multiplica por 2 en caso de haber otro tanque simétrico en la otra banda (de las mismas características).

| Tanques | Mto $K = 1$ | 10 ° | | 20 ° | | 30 ° | | 40 ° | |
|-----------|-------------|----------|------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | | K_{10} | Mto | K_{20} | Mto | K_{30} | Mto | K_{40} | Mto |
| Tanque 1 | 171,94 | 0,01 | 2,48 | 0,04 | 6,68 | 0,06 | 10,12 | 0,08 | 14,32 |
| Tanque 2 | 77,87 | 0,03 | 2,17 | 0,06 | 4,50 | 0,09 | 6,67 | 0,11 | 8,40 |
| Tanque 3 | 64,66 | 0,03 | 1,80 | 0,06 | 3,74 | 0,09 | 5,54 | 0,11 | 6,97 |
| Tanque 4 | 70,66 | 0,01 | 0,71 | 0,02 | 1,42 | 0,04 | 2,83 | 0,05 | 3,54 |
| Sumatorio | | | 7,16 | | 16,34 | | 25,16 | | 33,23 |

| Tanques | Mto $K = 1$ | 50 ° | | 60 ° | | 70 ° | | 80 ° | |
|-----------|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | | K_{50} | Mto | K_{60} | Mto | K_{70} | Mto | K_{80} | Mto |
| Tanque 1 | 171,94 | 0,10 | 17,95 | 0,12 | 19,87 | 0,12 | 20,83 | 0,12 | 20,07 |
| Tanque 2 | 77,87 | 0,11 | 8,57 | 0,10 | 7,95 | 0,09 | 7,34 | 0,08 | 6,57 |
| Tanque 3 | 64,66 | 0,11 | 7,11 | 0,10 | 6,61 | 0,09 | 6,10 | 0,08 | 5,45 |
| Tanque 4 | 70,66 | 0,08 | 5,66 | 0,12 | 8,48 | 0,15 | 10,59 | 0,16 | 11,30 |
| Sumatorio | | | 39,29 | | 42,91 | | 44,87 | | 43,38 |

Los valores de K para las distintas escoras, se obtiene por interpolación lineal en la tabla nº 1.

Una vez obtenido el sumatorio para las distintas escoras, no queda más que dividirlos por el desplazamiento para obtener las correcciones al brazo GZ para cada escora.

| | |
|---------------------|------------|
| $C^{on} 10^\circ =$ | 7,16/Desp |
| $C^{on} 20^\circ =$ | 16,34/Desp |
| $C^{on} 30^\circ =$ | 25,16/Desp |
| $C^{on} 40^\circ =$ | 33,23/Desp |
| $C^{on} 50^\circ =$ | 39,29/Desp |
| $C^{on} 60^\circ =$ | 42,91/Desp |
| $C^{on} 70^\circ =$ | 44,87/Desp |
| $C^{on} 80^\circ =$ | 43,38/Desp |

Corrección al GZ por asiento.

Cuando el asiento (aproante o apopante) difiere del de proyecto en más de un determinado porcentaje (2% Epp), o supera una determinada cifra (1 metro) se aplicará una corrección al valor del GZ calculado; esta corrección será de 2 centímetros (substractiva).

El cumplimiento de los criterios de estabilidad no asegura la inmunidad del buque a la zozobra en cualquier circunstancia.

Criterios de estabilidad

A nivel nacional, la norma es la Circular de Marina Mercante nº 9 de 7 de diciembre de 1977 que en un principio afecta a los buques pesqueros y por extensión a los remolcadores y la Circular nº 2 de 22 de mayo del año 1979.

De la Circular 2/79:

El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de valores GZ) no será inferior a 0,055 metros-radianes hasta el ángulo de inclinación de 30° ni inferior a 0,090 metros radianes hasta el ángulo de inclinación de 40°, o hasta el ángulo de comienzo de la inundación a través de las aberturas, si este es menor de 40°.

Asimismo, el área bajo la curva de brazos adrizantes entre los ángulos de inclinación de 30° y de 40°, o entre los ángulos de 30° y el de comienzo de la inundación a través de las aberturas, si éste es menor de 40°, no será inferior a 0,03 metros-radianes.

- El brazo adrizante GZ será como mínimo de 0,20 metros para un ángulo de inclinación igual o superior a 30°.

- El brazo adrizante máximo corresponderá a un ángulo de escora que no será inferior a 25°.

- La altura metacéntrica inicial no será inferior a 0,35 metros.

El ángulo de escora que tomará el remolcador al estar sometido, por separado, a cada uno de los momentos escorantes M1 y M2 (vistos anteriormente), y para cuya escora se produzca el equilibrio estático entre el momento escorante aplicado y el momento adrizante del remolcador (desplazamiento x brazo GZ correspondiente al ángulo de escora) será inferior al necesario para que se produzca la zozobra del remolcador o su inundación a través de las aberturas.