



Ref.: T1/2.03

MSC.1/Circ.1281
9 diciembre 2008

NOTAS EXPLICATIVAS DEL CÓDIGO INTERNACIONAL DE ESTABILIDAD SIN AVERÍA, 2008

1 El Comité de Seguridad Marítima adoptó en su 85º periodo de sesiones (26 de noviembre a 5 de diciembre de 2008), mediante la resolución MSC.267(85), el Código internacional de estabilidad sin avería, 2008 (Código de Estabilidad sin Avería 2008). Al adoptar el Código de Estabilidad sin Avería 2008, el Comité reconoció la necesidad de elaborar las notas explicativas oportunas para garantizar su interpretación y aplicación uniformes.

2 A tal efecto, el Comité aprobó las Notas explicativas del Código de Estabilidad sin Avería, 2008 que figuran en el anexo y que el Subcomité de Estabilidad y Líneas de Carga y de Seguridad de Pesqueros había elaborado en su 50º periodo de sesiones (30 de abril a 4 de mayo de 2007).

3 Las Notas explicativas tienen por objeto facilitar a las Administraciones y al sector del transporte marítimo orientaciones específicas para contribuir a la interpretación y aplicación uniformes de las prescripciones del Código de Estabilidad sin Avería 2008.

4 Se invita a los Gobiernos Miembros a que utilicen las Notas explicativas al aplicar las prescripciones sobre estabilidad sin avería del Código adoptadas mediante la resolución MSC.267(85) y a que las señalen a la atención de todas las partes interesadas.

ANEXO

**NOTAS EXPLICATIVAS DEL CÓDIGO INTERNACIONAL
DE ESTABILIDAD SIN AVERÍA, 2008**

Índice

	Página
CAPÍTULO 1: CUESTIONES GENERALES	2
1.1 Introducción	2
1.2 Finalidad	2
 CAPÍTULO 2: TERMINOLOGÍA	 2
 CAPÍTULO 3: ORIGEN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD ACTUALES	 4
3.1 Cuestiones generales	4
3.2 Fundamentos de los criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes (parte A del Código de Estabilidad sin Avería 2008)	5
3.3 Fundamentos de la fórmula aproximada para calcular la altura metacéntrica mínima GM_0 de los buques pesqueros pequeños (parte B, párrafo 2.1.5.1 del Código de Estabilidad sin Avería 2008)	18
3.4 Referencias sobre los párrafos 3.1 a 3.3	20
3.5 Fundamentos del criterio de viento y balance intensos (criterio meteorológico)	21
3.6 Referencias sobre el párrafo 3.5	31
 CAPÍTULO 4: ORIENTACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL CÓDIGO DE ESTABILIDAD SIN AVERÍA	 32
4.1 Criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes	32

NOTAS EXPLICATIVAS DEL CÓDIGO INTERNACIONAL DE ESTABILIDAD SIN AVERÍA, 2008

CAPÍTULO 1: CUESTIONES GENERALES

1.1 Introducción

Los criterios de estabilidad sin avería, enunciados con carácter obligatorio en la parte A y recomendados en la parte B del Código de Estabilidad sin Avería 2008, son reglas de carácter preceptivo que se elaboraron a partir de las estadísticas sobre la explotación de los buques y el criterio meteorológico a mediados del siglo XX. Con el fin de facilitar la comprensión y aplicación correctas de dichos criterios, en el capítulo 3 se exponen su origen y evolución.

1.2 Finalidad

La finalidad de estas notas explicativas es facilitar a los usuarios del Código información sobre la historia, los antecedentes y el método de elaboración de los criterios sobre estabilidad actuales que se incluyen en la parte A del Código de Estabilidad sin Avería 2008.

CAPÍTULO 2: TERMINOLOGÍA

Se observará que, aunque las abreviaturas enumeradas a continuación son bastante habituales, éstas no coinciden con las de la circular MSC/Circ.920, MODELO DE MANUAL DE CARGA Y ESTABILIDAD (sección 2.2, cuadro 1), que se basan en normas ISO (ISO 7462 e ISO 7463).

Deberá prestarse especial atención al peso asimétrico y a la distribución de la flotabilidad.

Abreviatura utilizada en el Código de Estabilidad sin Avería 2008	Término utilizado en MSC/Circ.920	Explicación
LCG	XG	Posición longitudinal del centro de gravedad (m desde la perpendicular de popa) Distancia longitudinal desde un punto de referencia al centro de gravedad; el punto de referencia suele encontrarse en la perpendicular de popa (proa + / popa -)
TCG	YG	Posición transversal del centro de gravedad (m desde el eje longitudinal) Distancia transversal desde un punto de referencia al centro de gravedad; el punto de referencia se encuentra en el eje longitudinal (babor + / estribor -)
VCG	KG	Posición vertical del centro de gravedad (m por encima de la línea base) Distancia vertical desde un punto de referencia al centro de gravedad; el punto de referencia se encuentra en la línea base (hacia arriba + / hacia abajo -)
LCB	XB	Posición longitudinal del centro de carena (m desde la perpendicular de popa) Distancia longitudinal desde un punto de referencia al centro de carena; el punto de referencia suele encontrarse en la perpendicular de popa (proa + / popa -)
TCB	--	Posición transversal del centro de carena (m desde el eje longitudinal) Distancia transversal desde un punto de referencia al centro de carena; el punto de referencia se encuentra en el eje longitudinal (babor + / estribor -)
VCB	--	Posición vertical del centro de carena (m por encima de la línea base) Distancia vertical desde un punto de referencia al centro de carena; el punto de referencia se encuentra en la línea base (hacia arriba + / hacia abajo -)
LCF	XF	Posición longitudinal del centro de flotación (m desde la perpendicular de popa) Distancia longitudinal desde un punto de referencia al centro de flotación; el punto de referencia suele encontrarse en la perpendicular de popa (proa + / popa -)
TCF	--	Posición transversal del centro de flotación (m desde el eje longitudinal) Distancia transversal desde un punto de referencia al centro de flotación; el punto de referencia se encuentra en el eje longitudinal (babor + / estribor -)

Es de importancia capital definir con claridad en todos los casos los puntos/planos de referencia y los signos de las direcciones positiva y negativa en el sistema de coordenadas del buque.

CAPÍTULO 3: ORIGEN DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD ACTUALES

3.1 Cuestiones generales

3.1.1 El Comité de Seguridad Marítima pidió al Subcomité de Estabilidad y Líneas de Carga y de Seguridad de Pesqueros (SLF) que elaborara una serie de prescripciones sobre estabilidad sin avería que abarcasen a todos los tipos de buques, a fin de incorporarlas posteriormente en el Convenio SOLAS, 1974. En el 33º periodo de sesiones del Subcomité (SLF 33), el Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería examinó esta cuestión y apuntó que la incorporación en el Convenio de una amplia gama de criterios de estabilidad que abarcaran distintos tipos de buques planteaba un problema de procedimiento y también reconoció que tales criterios no podían elaborarse a corto plazo. El Grupo propuso que se examinara en su lugar la posibilidad de elaborar un código general que incluyera las prescripciones sobre estabilidad existentes en aquel momento en todas las recomendaciones y códigos de la OMI para distintos tipos de buques. Posteriormente se podrían añadir criterios para otros tipos de buques a medida que se fuera examinando cada tipo de buque y se elaborasen los respectivos criterios. También propuso el Grupo que el Convenio SOLAS 1974 incluyera una norma básica de estabilidad y se remitiera al Código para los tipos de buque distintos, o bien se limitara únicamente a hacer referencia al Código. La propuesta de Código podría dividirse en dos partes: la parte A, que contendría las prescripciones obligatorias, y la parte B, que contendría las prescripciones recomendatorias. Se concedió prioridad a la elaboración del Código propuesto [OMI 1988].

3.1.2 Al examinar la propuesta del mencionado Grupo de trabajo, el SLF 33 acordó que convendría elaborar un código de estabilidad para todos los tipos de buques previstos en los instrumentos de la OMI (Código de Estabilidad sin Avería), de manera que las prescripciones sobre estabilidad generalmente aceptadas y especiales para todos los tipos de buques quedasen recogidas en una única publicación que facilite la consulta. Se pensó que esto era importante, dado que las prescripciones sobre estabilidad se encontraban dispersas en varios documentos, lo cual dificultaba su uso por parte de los proyectistas y las autoridades [OMI 1988a]. El Subcomité SLF hizo hincapié en que el Código debía incluir instrucciones sobre los procedimientos operacionales, así como características técnicas de proyecto. El Comité de Seguridad Marítima aprobó estas medidas en su 57º periodo de sesiones.

3.1.3 Polonia se encargó de cotejar las prescripciones sobre estabilidad previstas en los distintos instrumentos de la OMI y de elaborar el primer proyecto de código, después de lo cual se presentó a la OMI el correspondiente documento [OMI 1990]. Dicho documento constituyó la base para la elaboración del Código, que incluiría los siguientes grupos de prescripciones propuestos por Polonia [Kobylinski 1989], a saber:

- .1 construcción de los buques;
- .2 características físicas de los buques;
- .3 información disponible a bordo y ayudas a la navegación; y
- .4 aspectos operacionales.

3.1.4 El SLF 35 adoptó finalmente este modelo y decidió que el Código tuviese carácter recomendatorio. El SLF 37 aceptó el proyecto definitivo del Código, que sería adoptado más tarde mediante la resolución A.749(18) [OMI 1993]. Posteriormente fue enmendado en 1998 mediante la resolución MSC.75(69). El Código se consideró un documento "actualizable" sometido a examen continuo en el que se incorporarían todas las nuevas prescripciones que elaborase la OMI.

3.2 Fundamentos de los criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes (parte A del Código de Estabilidad sin Avería 2008)

3.2.1 Introducción

3.2.1.1 Los criterios de estabilidad estadística se incluyeron en un principio en las resoluciones A.167(ES.IV) y A.168(ES.IV). Dichos criterios se elaboraron a partir de las deliberaciones habidas en varios periodos de sesiones del Subcomité de Compartimentado y Estabilidad, precursor del Subcomité SLF, y en el Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería. Se acordó en general que los criterios deberían establecerse basándose en el análisis estadístico de los parámetros de estabilidad de los buques que sufrían siniestros y de los buques de funcionamiento seguro.*

3.2.1.2 El Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería aceptó un programa de trabajo que incluía los puntos siguientes:

- .1 cotejo, análisis y evaluación de los reglamentos nacionales o recomendaciones sobre estabilidad existentes;
- .2 evaluación de los parámetros de estabilidad que podrían utilizarse como criterios de estabilidad;
- .3 recopilación de las características de estabilidad de los buques que registran siniestros o escoras peligrosas en circunstancias que sugieren una estabilidad insuficiente;
- .4 recopilación de las características de estabilidad de los buques de funcionamiento seguro;
- .5 análisis comparativo de los parámetros de estabilidad de los buques que registran siniestros y de los buques de funcionamiento seguro;
- .6 estimación de valores críticos para los parámetros de estabilidad seleccionados; y
- .7 comprobación de los criterios formulados en un determinado número de buques actuales.

* En los artículos de Nadeinski y Jens [1968] y Thompson y Tope [1970] se da cuenta del examen detallado de la labor de los órganos de la OMI mencionados y del método utilizado en la elaboración de las normas de estabilidad.

3.2.1.3 El análisis de las prescripciones nacionales sobre estabilidad existentes (párrafo 3.2.1.2.1) [OMI 1964] reveló una congruencia notable en cuanto a la aplicabilidad de determinados parámetros como criterios de estabilidad. Asimismo, se indicó que numerosos países tenían tendencia a adoptar el criterio meteorológico. Sin embargo, el Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería no examinó el criterio meteorológico en aquel momento.

3.2.1.4 En lo que respecta al párrafo 3.2.1.2.2 del programa, el Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería destacó un grupo de parámetros que caracterizan la curva de brazos adrizantes con el buque parado en aguas tranquilas ($V=0$). Se siguió dicho procedimiento a pesar de los cambios que experimenta la curva de estabilidad estática cuando el buque navega en mar encrespada. Sin embargo, se decidió que la única solución práctica sería la utilización de la curva de brazos adrizantes "estipulada", que podría caracterizarse mediante el conjunto de parámetros que figura a continuación:

- .1 estabilidad inicial: GM_0 ,
- .2 brazos adrizantes a los ángulos: GZ_{10} , GZ_{20} , GZ_{30} , GZ_{40} , GZ_{ϕ} , GZ_m ,
- .3 ángulos: ϕ_m , ϕ_v , ϕ_f , ϕ_{fd} ,
- .4 brazos de estabilidad dinámica: e_{20} , e_{30} , e_{40} , e_{ϕ} .

3.2.1.5 Sea como fuere, el número de parámetros de estabilidad que podrían utilizarse como criterios de estabilidad debería ser limitado. Por consiguiente, al analizar los parámetros utilizados en diversas prescripciones nacionales sobre estabilidad, el Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería concluyó que era preciso examinar más a fondo los ocho parámetros siguientes: GM_0 , GZ_{20} , GZ_{30} , GZ_m , ϕ_m , ϕ_v , ϕ_{fd} , e .

3.2.1.6 Durante la labor apuntada en el párrafo 3.2.1.2.3 del programa, se creó y distribuyó entre los países Miembros de la OMI un modelo especial de expediente de siniestro [OMI 1963]. Se pidió que el modelo se cumplimentara con esmero, incluyendo todos los detalles posibles del siniestro. Se recopilaron un total de 68 expedientes de siniestro de buques de pasaje y buques de carga y 38 expedientes de siniestro de buques pesqueros [OMI 1966, 1966a]. Posteriormente, algunos países presentaron más expedientes de siniestro, de modo que, en el segundo análisis, efectuado en 1985, se dispuso de datos sobre 93 buques de pasaje y buques de carga y 73 buques pesqueros [OMI 1985]. A partir de los datos presentados se elaboraron cuadros con los pormenores de los siniestros.

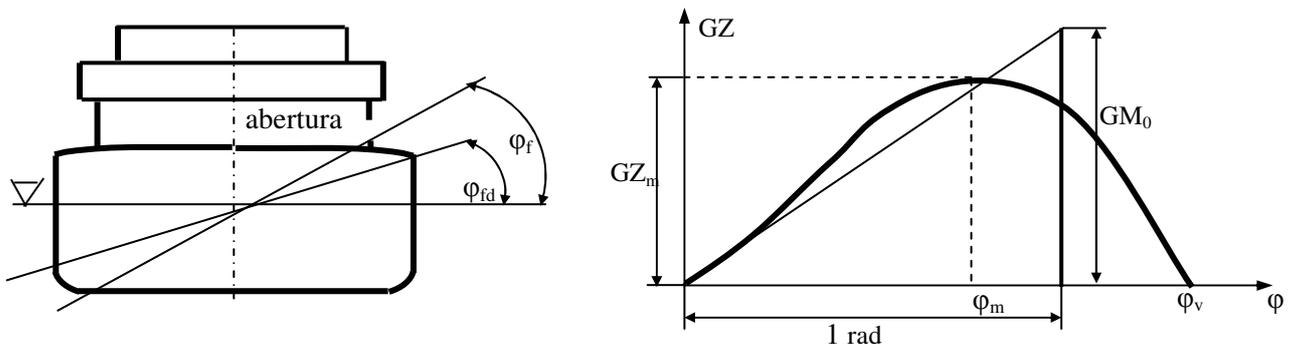


Figura 1: Explicación de los brazos adrizantes y los ángulos de escora

3.2.1.7 En el marco del párrafo 3.2.1.2.4 del programa se recopilaban datos sobre las características de estabilidad de 62 buques de pasaje y buques de carga y de 48 buques pesqueros de funcionamiento seguro, y se elaboró una instrucción especial con especificaciones detalladas acerca del modo en que debería presentarse la información sobre estabilidad. También se elaboraron cuadros con parámetros de estabilidad para estos buques.

3.2.1.8 El párrafo 3.2.1.2.5 del programa contemplaba el análisis de los datos recopilados, y los resultados fueron presentados a la OMI en varios documentos, separando los relativos a los buques de pasaje y buques de carga de los correspondientes a los buques pesqueros [OMI 1965; 1966; 1966a; 1966b].

3.2.1.9 Después de que se adoptaran las resoluciones A.167(ES.IV) y A.168(ES.IV) de la OMI y de que se recopilaban más datos sobre siniestros sufridos por pérdida de estabilidad sin avería, se decidió repetir el análisis para determinar si el uso de otros datos podría modificar las conclusiones extraídas en el primer análisis. El segundo análisis confirmó, en general, los resultados obtenidos en el primero [OMI 1985]. A continuación se hace referencia a los resultados del segundo análisis, efectuado a partir de la base de datos más amplia.

3.2.1.10 El análisis constó de dos partes. En la primera se evaluaron detalles de los siniestros, lo cual permitió extraer conclusiones cualitativas sobre las circunstancias de siniestros posteriores y, por consiguiente, especificar las precauciones generales sobre seguridad. En la segunda parte se compararon los parámetros de estabilidad de buques siniestrados y los de buques de funcionamiento seguro. En el análisis se adoptaron dos métodos: el primero era idéntico al de Rahola [Rahola 1939], mientras que el segundo era un análisis de discriminación. En el párrafo 3.2.2.2 se exponen los resultados del análisis de los datos sobre siniestros sufridos por pérdida de estabilidad sin avería y de la primera parte del análisis de los parámetros de estabilidad. En el párrafo 3.2.2.3 se indican los resultados del análisis de discriminación.

3.2.2 *Resultados del análisis de los expedientes de siniestros sufridos por pérdida de estabilidad sin avería y de los parámetros de estabilidad*

3.2.2.1 *Análisis de los detalles pertinentes de los siniestros*

3.2.2.1.1 En las figuras 2 a 7 se evalúan los detalles pertinentes de los siniestros.

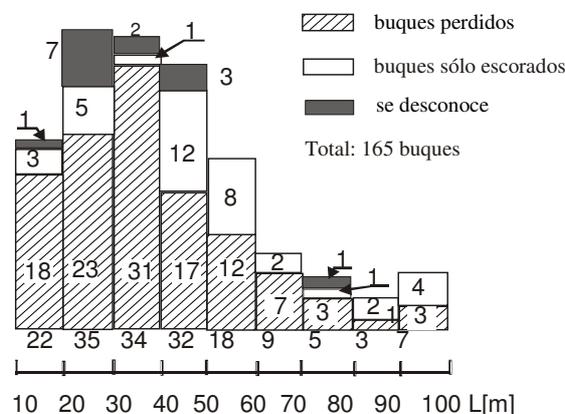


Figura 2: Distribución de los buques que sufrieron zozobra, según su eslora, a partir de los datos recopilados por la OMI [1985]

3.2.2.1.2 Los buques afectados en los 166 siniestros notificados se desglosan de la siguiente manera: 80 buques de carga, un buque de carga y pasaje, un granelero, cuatro buques de suministro mar adentro, siete buques para fines especiales y 73 buques pesqueros. La figura 2 muestra la distribución de los buques según su eslora, y en ella puede verse que la mayoría de los siniestros se produjeron en buques de eslora inferior a 60 m.

3.2.2.1.3 Los buques transportaban cargas muy variadas, por lo que no pudieron extraerse conclusiones definitivas. No obstante, cabe señalar que en 35 de los 80 buques de carga notificados había carga sobre cubierta.

3.2.2.1.4 La figura 3 muestra los resultados del análisis de los lugares del siniestro. En ella puede verse que la mayoría de los siniestros (el 72 % del total) ocurrieron en zonas de aguas restringidas, estuarios y a lo largo del litoral. Algo lógico, dado que la mayoría de los buques perdidos tenían menos de 60 m de eslora. El análisis de las estaciones en las que se produjeron los siniestros (figura 4) permite concluir que el otoño es la más peligrosa (41 % del total de siniestros).

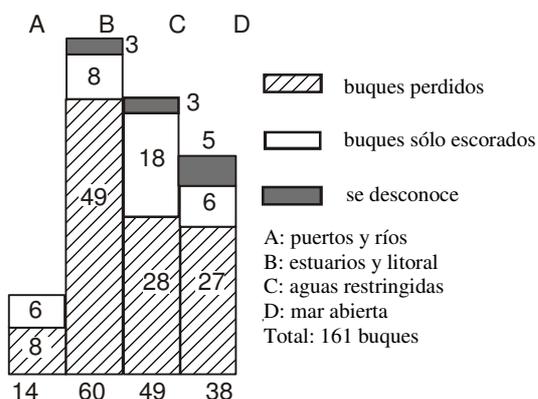


Figura 3: Lugar del siniestro [OMI 1985]

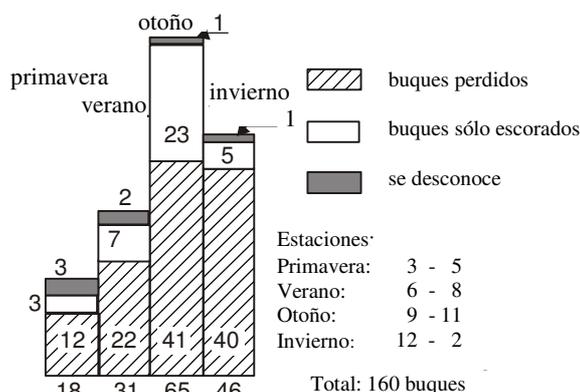


Figura 4: Estación del siniestro [OMI 1985]

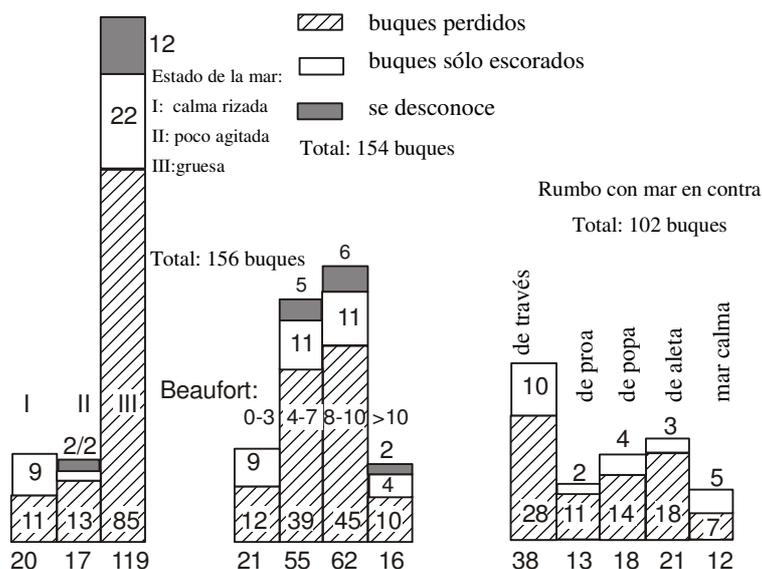


Figura 5: Estado de la mar y del viento durante el siniestro [OMI 1985]

3.2.2.1.5 La figura 5 muestra los resultados del análisis de las condiciones meteorológicas. Aproximadamente el 75 % de todos los siniestros se produjeron con mar gruesa y vientos de fuerza 4 a 10 en la escala de Beaufort. Los buques navegaban en su mayoría con mar de través y, en menor número, con mar de aleta y de popa.

3.2.2.1.6 También se analizó el tipo de siniestro (figura 6). Se comprobó que la zozobra repentina o gradual constituía el siniestro más habitual. Los buques sobrevivieron al siniestro y sólo experimentaron escora en el 30 % de los casos, aproximadamente.

3.2.2.1.7 La figura 7 muestra los resultados del análisis de la edad de los buques. Dicho análisis no permitió extraer conclusiones definitivas.

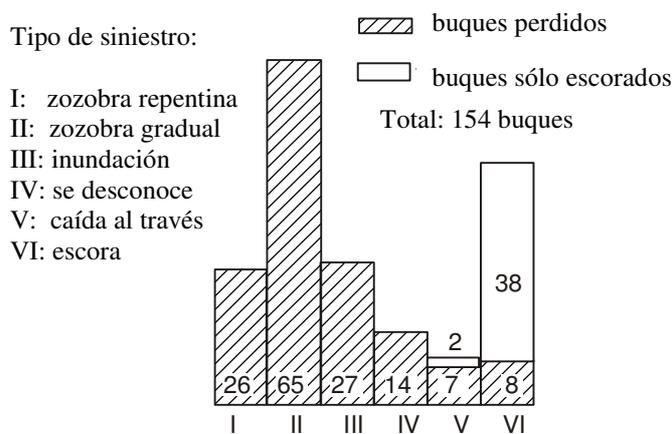


Figura 6: Tipo de siniestro [OMI 1985]

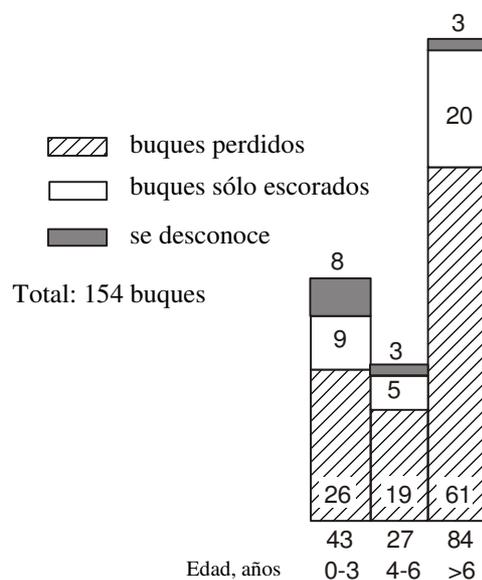


Figura 7: Edad del buque en el momento del siniestro [OMI 1985]

3.2.2.1.8 Las figuras 8 a 14 muestran las distribuciones de los parámetros de estabilidad de acuerdo con las condiciones del buque en el momento de la pérdida.

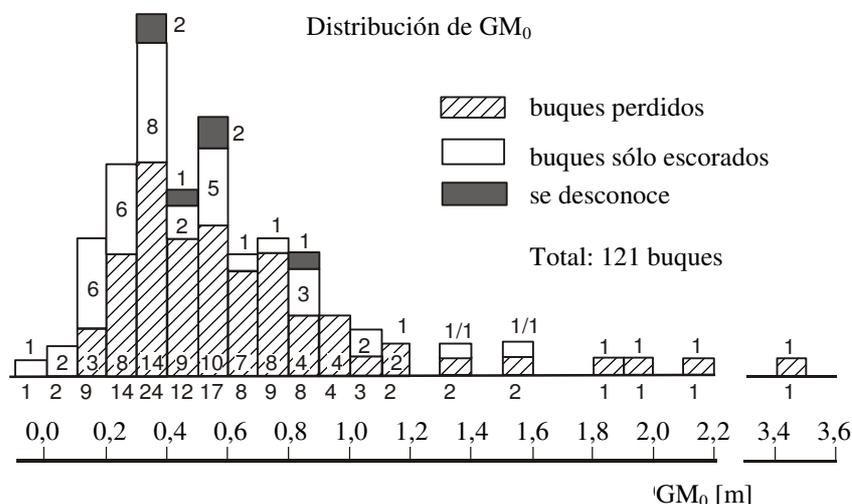


Figura 8: Condición en el momento del siniestro. Distribución de GM_0 [OMI 1985]

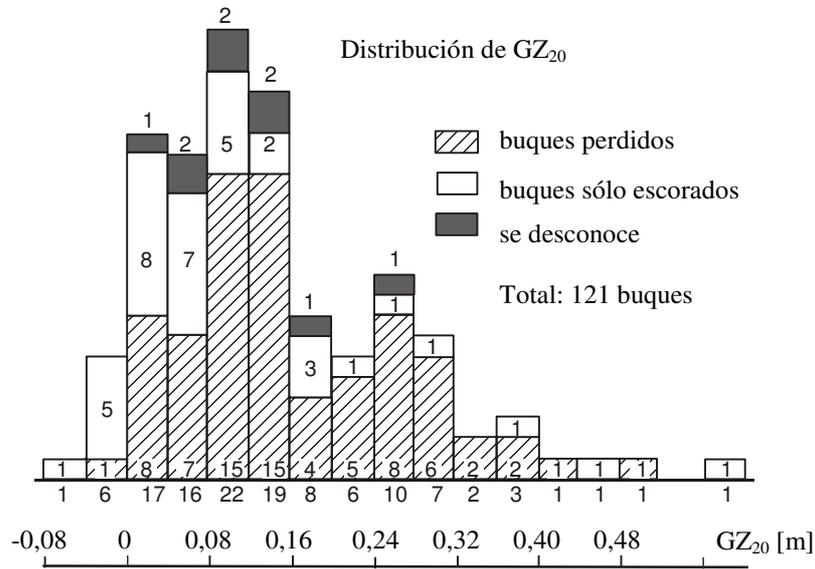


Figura 9: Condición en el momento del siniestro. Distribución de GZ_{20} [OMI 1985]

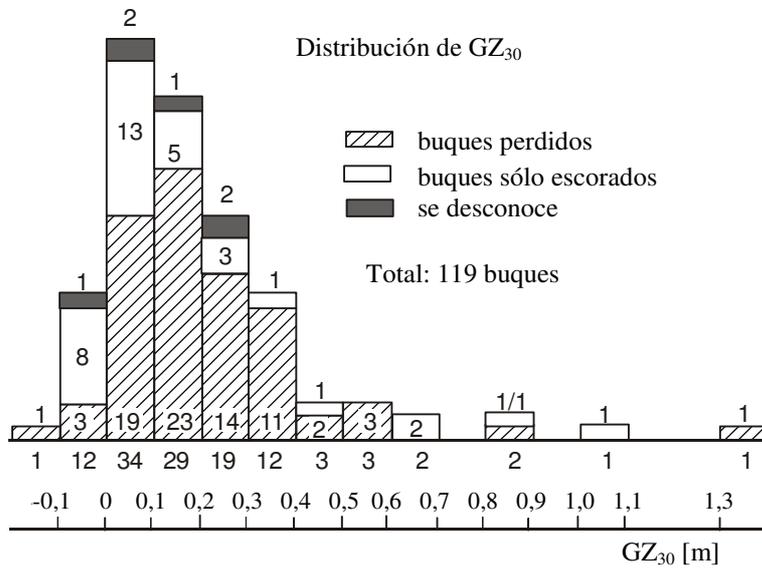


Figura 10: Condición en el momento del siniestro. Distribución de GZ_{30} [OMI 1985]

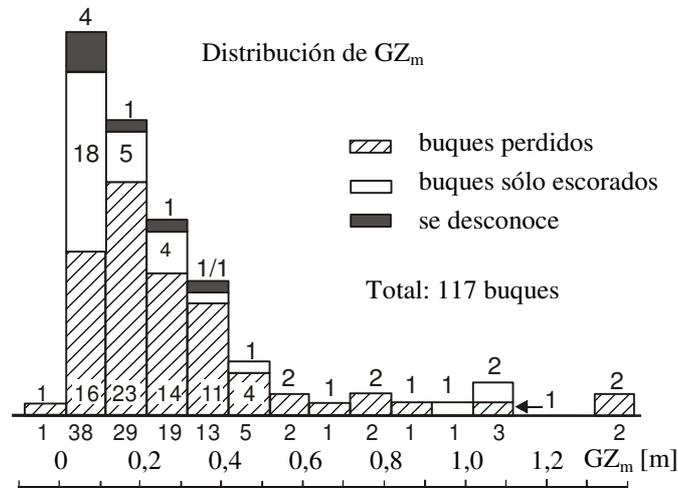


Figura 11: Condición en el momento del siniestro. Distribución de GZ_m [OMI 1985]

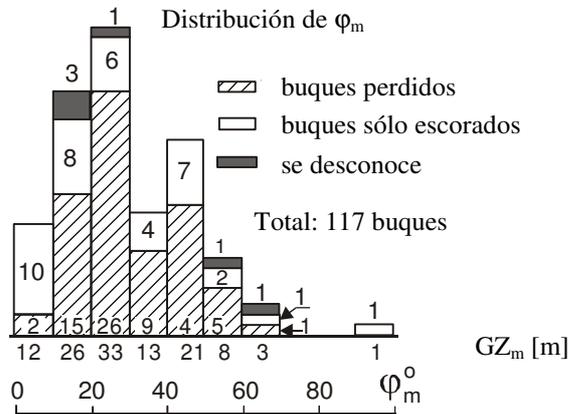


Figura 12: Condición en el momento del siniestro. Distribución de ϕ_m [OMI 1985]

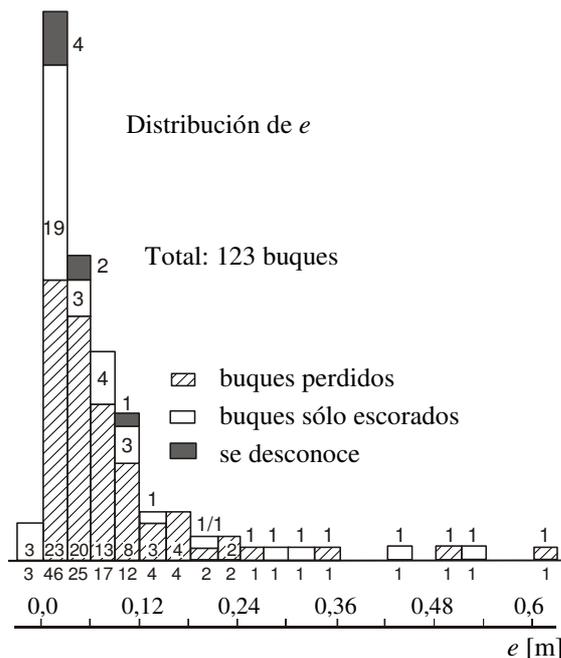


Figura 13: Condición en el momento del siniestro. Distribución de e [OMI 1985]

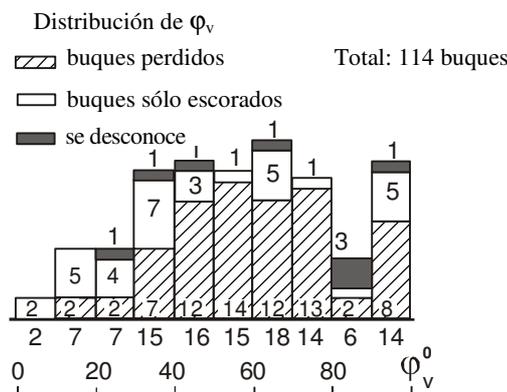


Figura 14: Condición en el momento del siniestro. Distribución de ϕ_v [OMI 1985]

3.2.2.2 Análisis de los parámetros de estabilidad mediante el método Rahola

3.2.2.2.1 Los parámetros de estabilidad según las condiciones de los siniestros se analizaron mediante representaciones gráficas similares a las de Rahola y basándose en la comparación con los parámetros de buques de funcionamiento seguro.

3.2.2.2.2 Los parámetros seleccionados para el análisis fueron GM_0 , GZ_{20} , GZ_{30} , GZ_{40} , GZ_m , e_{40} y ϕ_m . A partir de los datos disponibles se elaboraron histogramas en los que se introdujeron los valores respectivos de los parámetros de estabilidad de acuerdo con las condiciones de los siniestros, empezando por el valor mayor a la izquierda de la línea vertical (ordenada) y concluyendo con el valor más bajo, mientras que los valores correspondientes al mismo parámetro para buques seguros se colocaron a la derecha, empezando por el valor más pequeño y terminando con el más alto. Por consiguiente, en la ordenada, el valor mayor del parámetro para la condición de siniestro se encontrará próximo al valor más bajo del parámetro para el caso seguro. La figura 15 muestra como ejemplo un diagrama de los brazos adrizantes de todos los buques analizados. En el análisis original [OMI 1966, 1966a, 1985] se elaboraron diagramas por separado para los buques de carga y los buques pesqueros, si bien dichos diagramas no se reproducen en el presente documento.

3.2.2.2.3 En el diagrama (figura 15) los valores correspondientes a la condición de siniestro aparecen sombreados y sólo se dejan en blanco los que requieren un examen especial debido a circunstancias excepcionales. Se sombrearon las zonas que quedan por encima de los escalones a la derecha de la ordenada para distinguir más fácilmente entre los casos seguros y no seguros. Las líneas límite o las curvas imaginarias del brazo correspondiente a la estabilidad estática se trazaron de igual manera que en el diagrama de Rahola. En el cuadro 1 se muestran los porcentajes de los buques en condición de llegada y los parámetros de estabilidad respectivos que se sitúan por debajo de las líneas límite. Los porcentajes inferiores denotan en general una discriminación mejor entre las condiciones seguras y no seguras.

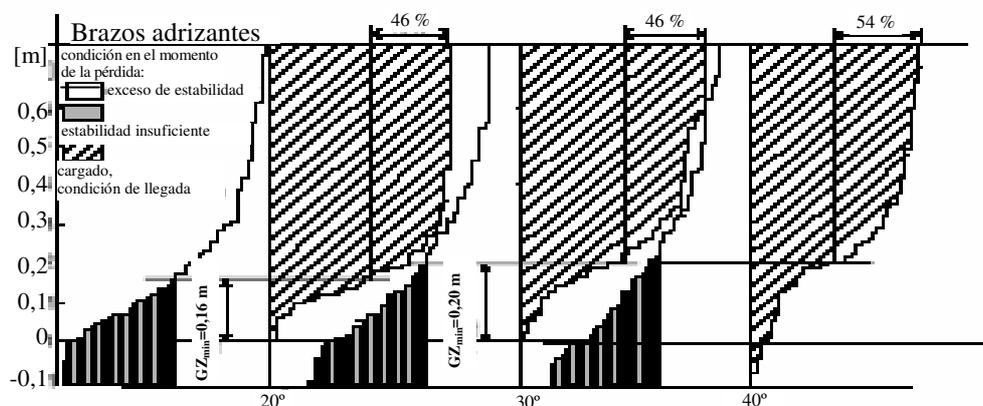


Figura 15: Diagrama de los brazos adrizantes de distintos buques (únicamente de carga) en el momento del siniestro [OMI 1966, 1985]

Cuadro 1: Porcentajes de los buques que se encuentran por debajo de la línea límite

Parámetro de estabilidad	Porcentajes		
	todos los buques	buques de carga	buques pesqueros
GZ_{20}	39	54	26
GZ_{30}	48	54	42
GZ_{40}	48	46	48
e	55	56	53

3.2.2.2.4 El tipo de análisis descrito *supra* no es totalmente riguroso; se basa en parte en la intuición y permite una evaluación arbitraria. No obstante, en cuanto a su aplicación práctica, ofreció resultados aceptables y se tomó como base para los criterios de estabilidad de la OMI.

3.2.2.3 Análisis de discriminación

3.2.2.3.1 El método del análisis de discriminación puede aplicarse cuando, como en el presente caso, se dispone de dos conjuntos de datos (uno sobre buques que han zozobrado y otro sobre buques considerados seguros) y han de obtenerse los valores críticos de los parámetros para los dos conjuntos.

3.2.2.3.2 La aplicación del análisis de discriminación para calcular los valores críticos de los parámetros de estabilidad se incluyó en un informe conjunto [OMI 1966, 1966a] y constituyó, junto con el método Rahola descrito anteriormente, la base para la elaboración de los criterios de estabilidad de la OMI.

3.2.2.3.3 En dicho estudio, el análisis de discriminación se aplicó de modo independiente a nueve parámetros de estabilidad. Se representaron las funciones de distribución a partir de los datos procedentes de los expedientes de siniestros sufridos por pérdida de estabilidad sin avería (grupo 1) y de los cálculos de estabilidad sin avería para buques considerados de funcionamiento seguro (grupo 2), trazándose la función de distribución F_1 para el grupo 1 y la función $(1 - F_2)$ para el grupo 2. En el eje de abscisas figuraban los valores del parámetro de estabilidad

respectivo, mientras que en el de ordenadas se incluyeron los porcentajes, con respecto al total, de los buques cuyo parámetro respectivo era, de acuerdo con las estimaciones, inferior al valor real de los buques del grupo 1 y superior al valor real de los buques del grupo 2, considerados seguros.

3.2.2.3.4 El punto de intersección de ambas curvas en el diagrama permite obtener el valor crítico del parámetro en cuestión. Dicho valor divide a los parámetros de los grupos 1 y 2. Idealmente, las dos funciones de distribución no deberían cortarse, en cuyo caso el valor crítico del parámetro respectivo sería el punto entre las dos curvas (véase la figura 16).

3.2.2.3.5 En realidad, las dos curvas siempre se cortan y se toma el punto de intersección como el valor crítico del parámetro. En dicho punto coinciden el porcentaje de buques siniestrados con un valor del parámetro respectivo superior al valor crítico y el porcentaje de buques seguros con un valor del parámetro inferior a dicho valor crítico.

3.2.2.3.6 El conjunto de diagramas se elaboró de esta manera para diversos parámetros de estabilidad, a partir de las estadísticas de la OMI sobre buques de carga y de pasaje y sobre buques pesqueros. Uno de los diagramas se reproduce en la figura 17. De acuerdo con él, la probabilidad de zozobra de un buque con un parámetro considerado superior al valor crítico coincide con la probabilidad de supervivencia de un buque cuyo parámetro sea inferior a dicho valor crítico.

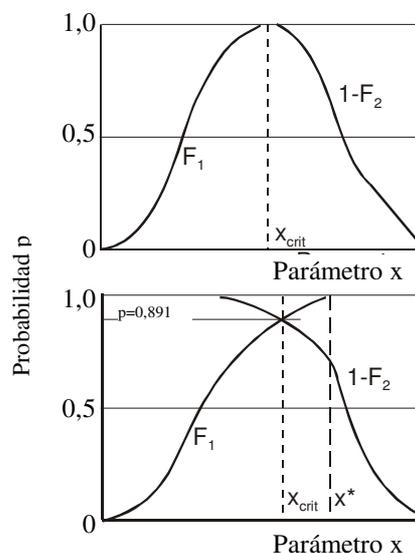


Figura 16: Estimación del parámetro crítico

3.2.2.3.7 A fin de que la probabilidad de supervivencia sea mayor, el valor del parámetro deberá aumentar, por ejemplo, hasta x^* (figura 16), para el cual la probabilidad de supervivencia (basada en la población estudiada) sería igual al 100 %. Sin embargo, esto supondría que el criterio es excesivamente riguroso, algo no viable en la práctica porque los valores poco reales de los parámetros obtenidos a partir de la intersección de curvas podrían explicarse de dos formas. Es posible que los buques del grupo 2 cuyo parámetro en cuestión cumple $x < x_{crit}$ no sean seguros, pero que tuvieran la fortuna de no encontrar condiciones ambientales excesivamente rigurosas que podrían haber causado su zozobra. Asimismo, cabría concluir que el examen de un único parámetro de estabilidad no basta para evaluar la estabilidad del buque.

3.2.2.3.8 Esta última consideración se tradujo en el intento de utilizar la base de datos de la OMI para un análisis de discriminación en el que se estudió un conjunto de parámetros de estabilidad [Krappinger y Sharma 1974]. No obstante, los resultados de dicho análisis estuvieron disponibles después de que el Subcomité SLF adoptara los criterios de las resoluciones A.167(ES.IV) y A.168(ES.IV) y no fueron tenidos en cuenta.

3.2.2.3.9 Como puede deducirse de la figura 17, es difícil estimar con precisión los valores críticos de los parámetros respectivos, dado que dichos valores son muy sensibles a la forma de las curvas en las proximidades del punto de intersección, en especial si el grupo de buques es reducido.

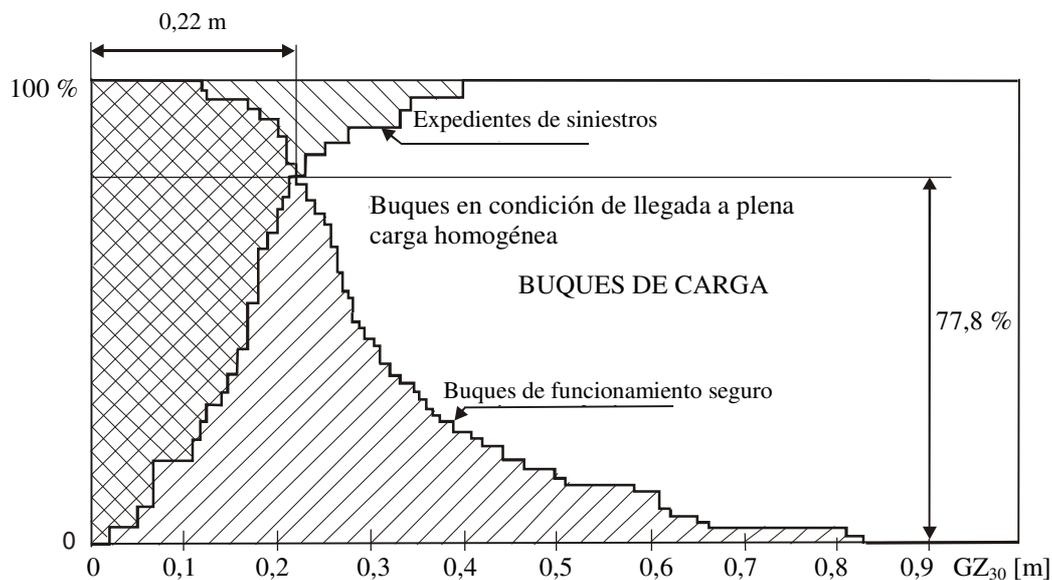


Figura 17: Análisis de discriminación para el parámetro GZ_{30} [OMI 1965]

3.2.2.4 *Adopción de los criterios definitivos y comprobación de los criterios en un número determinado de buques*

3.2.2.4.1 Los criterios definitivos se evaluaron a partir de los diagramas presentados en las figuras 15 y 17. El conjunto principal de diagramas incluía curvas de brazos adrizantes (figura 15), pero también se añadieron diagramas con la distribución de los brazos correspondientes a la estabilidad dinámica. Los diagramas se elaboraron conjuntamente para los buques de carga y de pasaje y para los buques pesqueros, con la salvedad de los buques que transportan cubiertas de madera. También se representó por separado un conjunto de diagramas para buques de carga y buques pesqueros. Tal como se indica en la figura 17, se elaboraron diagramas por separado con respecto a cada parámetro de estabilidad para los buques de carga y de pasaje y para los buques pesqueros.

3.2.2.4.2 Tras las deliberaciones en el Grupo de trabajo sobre estabilidad sin avería y el Subcomité SLF, los criterios de estabilidad se concluyeron y adoptaron tal como figuran en las resoluciones A.167(ES.IV) y A.168(ES.IV).

3.2.2.4.3 En el análisis original también se incluyó el ángulo de estabilidad nula, si bien este parámetro no se mantuvo en la propuesta final debido a la amplia dispersión de sus valores.

3.2.2.4.4 Dado que cada criterio o sistema de criterios debe comprobarse en una muestra de la población de buques existentes, era necesario encontrar la referencia común para los resultados de la comparación obtenidos al aplicar los distintos criterios. La referencia más oportuna para la comparación resultó ser KG_{crit} , el máximo valor de KG admisible que cumple el criterio o sistema de criterios, y cuanto mayor sea KG_{crit} , menos riguroso será el criterio.

3.2.2.4.5 Por ejemplo, los criterios relativos a las curvas del brazo adrizante pueden expresarse con la siguiente ecuación:

$$GZ = KZ - KG \text{sen}\phi \tag{1}$$

y

$$KG = \frac{KZ(\Delta, \phi) - GZ}{\text{sen}\phi} \tag{2}$$

3.2.2.4.6 Si se introducen valores de los criterios respectivos para GZ y ϕ , se obtendrán valores de KG_{crit} para el desplazamiento correspondiente. A continuación puede trazarse la curva $KG_{crit} = f(\Delta)$. También puede obtenerse KG_{crit} gráficamente, tal como indica la figura 18. Es asimismo posible calcular valores de KG_{crit} para los criterios dinámicos, pero el método es más complicado.

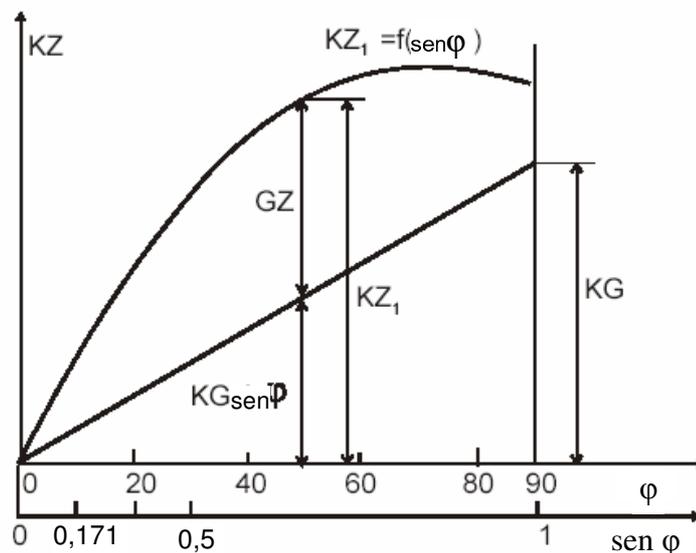


Figura 18: Estimación gráfica de KG_{crit}

3.2.2.4.7 La figura 19 muestra los resultados de los cálculos de KG_{crit} para un buque pesquero [OMI 1966]. En la figura se representan las curvas $KG_{crit} = f(\Delta)$ para 11 criterios distintos. Al disponer de dichas curvas para cada criterio individual, la curva KG crítica para un sistema de criterios puede representarse de modo sencillo trazando la envolvente.

3.2.2.4.8 Las curvas para KG_{crit} que se incluyen en la figura 19 también permiten extraer conclusiones sobre la exigencia relativa de diversos criterios o sistemas de criterios y destacar el que sea determinante. Si se dispone además de los valores reales de KG para el buque en cuestión, podrá evaluarse si el buque cumple los criterios y cuál de éstos se traduce en la condición más cercana a la real. Si se supone que los buques en servicio son seguros desde el punto de vista de la estabilidad, puede deducirse cuál es el criterio o sistema de criterios que mejor se ajusta sin una reserva excesiva de estabilidad.

3.2.2.4.9 Teniendo en cuenta que:

$$k = \frac{KG_{real}}{KG_{critica}}$$

se ha establecido un histograma de la distribución de k para el grupo de buques analizados (figura 20).

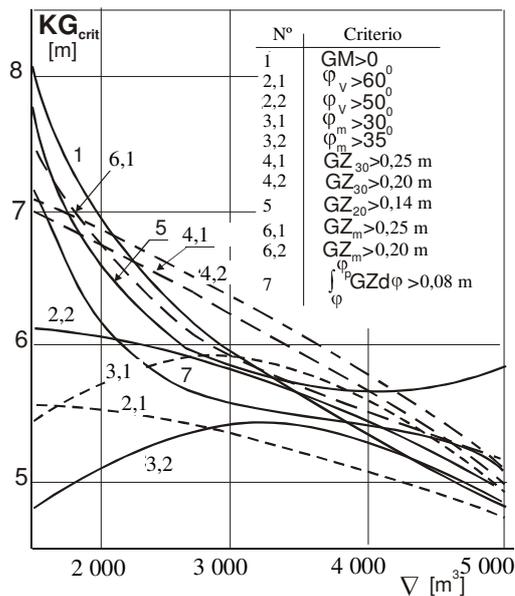


Figura 19: Diagrama de las curvas KG_{crit} para diversos criterios

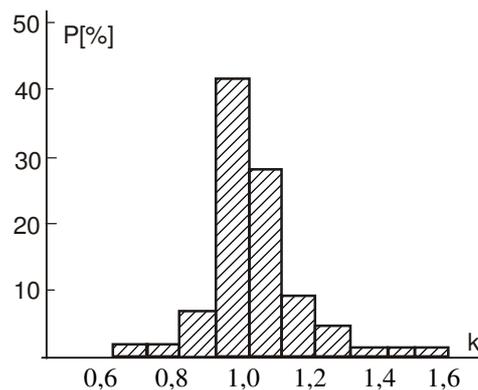


Figura 20: Distribución del coeficiente k para un grupo de buques analizados [Sevastianov 1968]

3.3 Fundamentos de la fórmula aproximada para calcular la altura metacéntrica mínima GM_0 de los buques pesqueros pequeños (parte B, párrafo 2.1.5.1 del Código de Estabilidad sin Avería 2008)

3.3.1 La fórmula aproximada para calcular la altura metacéntrica mínima de los buques pesqueros pequeños se elaboró con el método del análisis de regresión. En 1967, el Panel de expertos en estabilidad de los buques pesqueros de la OMI recomendó elaborar una norma apropiada de estabilidad para los buques pesqueros pequeños de eslora inferior a 30 m. El motivo aducido fue la falta frecuente de planos y datos sobre estabilidad para los buques pesqueros pequeños, lo cual impide la aplicación de los criterios recogidos en la resolución A.168(ES.IV). Se propuso la posibilidad de elaborar una norma de estabilidad para esos buques en forma de una fórmula de cálculo de GM_{crit} que pueda compararse con la GM_0 real, calculada a partir de la prueba de balance. El valor de GM_{crit} debería ajustarse al criterio de la resolución A.168(ES.IV).

3.3.2 Con el fin de elaborar la fórmula oportuna, se pidió a los miembros del Panel que presentaran datos sobre estabilidad para el mayor número posible de buques pesqueros pequeños e información sobre las fórmulas aproximadas de GM_{crit} utilizadas en sus países, caso de que las hubiera. Las fórmulas se compararon en una etapa posterior con las fórmulas obtenidas a partir del análisis de regresión. El examen de todas las fórmulas aproximadas reveló una dispersión bastante amplia de los valores de GM_{crit} , lo cual era previsible, ya que es obvio que las fórmulas no tienen en cuenta todos los parámetros del casco del buque que son importantes desde el punto de vista de la estabilidad. Por consiguiente, la OMI no adoptó ninguna de las fórmulas y se decidió elaborar una nueva basada en el análisis de regresión de un número mayor de datos para buques pesqueros pequeños.

3.3.3 Las fórmulas deberían facilitar resultados lo más parecidos posible a los obtenidos con los criterios de la OMI que figuran en la resolución A.168(ES.IV). Dada la imposibilidad de tener en cuenta todos los criterios, se decidió que $GZ_{30} = 0,20$ m fuera el criterio representativo que debe cumplirse.

3.3.4 Se han recopilado y analizado datos sobre estabilidad para 119 buques de eslora comprendida entre 15 y 29 m [OMI 1968a].

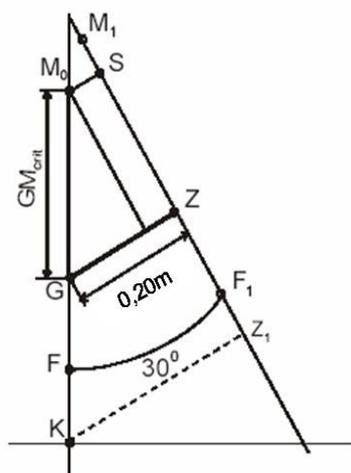


Figura 21: Relación entre GM_{crit} y $GZ = 0,20$ m

3.3.5 Dado que la condición para GM_{crit} es $GZ_{30} = 0,2$ m, se cumplirá lo siguiente (fig. 21):

$$GZ_{30} = GM_0 \text{ sen } 30^\circ + MS_{30} \quad (3)$$

por tanto:

$$GM_{crit} = 0,40 - 2B \left(\frac{MS_{30}}{B} \right) \quad (4)$$

3.3.6 Dado que MS_{30}/B sólo depende de parámetros geométricos del casco, podría utilizarse no sólo para evaluar GM_{crit} , sino también para comparar formas distintas del casco desde el punto de vista de la estabilidad.

3.3.7 Suponiendo que, en general, $\frac{MS_{30}}{B} = f \left\{ \frac{f}{B}, \frac{B}{D}, \frac{l_{sup}}{L} \right\}$, se probaron expresiones polinómicas de

distinto tipo con coeficientes evaluados mediante el análisis de regresión. En la estimación de GM_{crit} , la evaluación de los errores de las expresiones con respecto a la GM_{crit} real de los buques analizados demostró, como estaba previsto, que la GM_{crit} calculada era inferior a la real para aproximadamente el 50 % de los buques y mayor para el otro 50 % (figura 22a), con una distribución de errores considerada aceptable. A fin de mejorar la seguridad, se estimó conveniente aumentar los valores calculados de GM_{crit} en una determinada magnitud, C_{GM} , con objeto de llegar a una situación en la que aproximadamente el 85 % de los buques se encuentre en el lado seguro (figura 22b). El C_{GM} adicional fue evaluado mediante iteración, y se determinó que el valor correcto es $C_{GM} = 0,1250$.

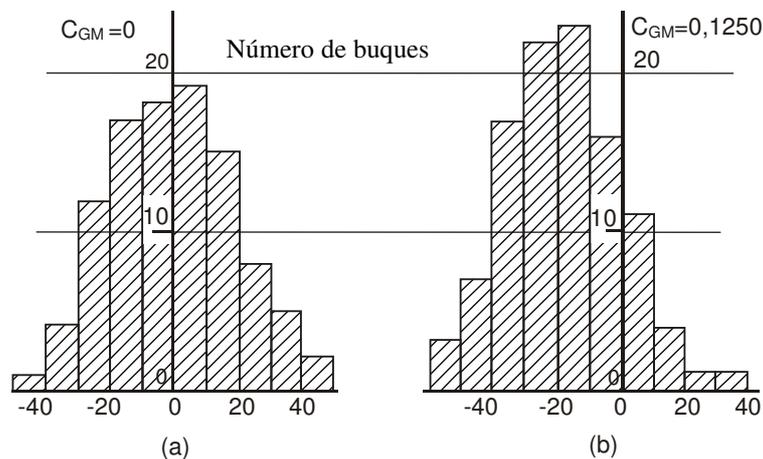


Figura 22: Distribución de los errores en la estimación de GM_{crit} para los buques pesqueros pequeños

3.3.8 La fórmula (4) se modificó del siguiente modo:

$$GM_{crit} = 0,40 + C_{GM} - 2B \left(\frac{MS_{30}}{B} \right) \quad (5)$$

3.3.9 La fórmula que se incluyó finalmente en la resolución A.207(VII) de la OMI era:

$$GM_{crit} = 0,40 + C_{GM} - 2B \left[a_0 + a_1 \left(\frac{f}{B} \right) + a_2 \left(\frac{f}{B} \right)^2 + a_3 \left(\frac{B}{T} \right) + a_4 \left(\frac{l_{sup}}{L} \right) \right] \quad (6)$$

donde:

$C_{GM} = 0,1250$	$a_2 = -0,8340$
$a_0 = -0,0745$	$a_3 = 0,0137$
$a_1 = 0,3704$	$a_4 = 0,0321$

3.4 Referencias sobre los párrafos 3.1 a 3.3

OMI, (1963). *Intact stability casualty record*, documento IS II/12.

OMI, (1964). *Report on the national requirements for intact stability of ships*, documento IS III/3.

OMI, (1965). *Analysis of intact stability casualty records*, documentos IS IV/11 y IS IV/14.

OMI, (1966). *Analysis of intact stability casualty records of cargo and passenger vessels*, documento IS VI/3.

OMI, (1966a). *Analysis of intact stability record of fishing vessels*, documento PFV IV/2.

OMI, (1966b). *Analysis of intact stability casualty records of fishing vessels*, documento PFV IV/2/Add.1.

OMI, (1967). *Analysis of the application of various stability criteria of fishing vessels*. Part II, documento PFV VI/24.

OMI, (1968). *Analysis of simplified formulae for judgement of stability of fishing vessels*, documento PFV VI/8.

OMI, (1968a). *Simplified stability criteria for decked fishing vessels under 30 m in length*, documentos PFV VIII/12 y PFV IX/4/1.

OMI, (1968b). "Recomendaciones sobre estabilidad al estado intacto para buques de pasaje y de carga de menos de 100 m de eslora", resolución A.167(ES.IV).

OMI, (1968c). "Recomendación sobre estabilidad al estado intacto de buques pesqueros", resolución A.168(ES.IV).

OMI, (1977a). *Intact stability criteria*, documento STAB XX (oficioso).

OMI, (1985). "Análisis de expedientes de siniestros relacionados con la estabilidad al estado intacto", documentos SLF 30/4/4 y SLF 38.

OMI, (1988). "Estabilidad sin avería. Informe del Grupo especial de trabajo", documento SLF 33/WP.8.

OMI, (1988a). "Informe del Comité de Seguridad Marítima", documento SLF 33/12.

OMI, (1990). "Proyecto de código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI", documento SLF 34/3/7.

OMI, (1993). "Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI", resolución A.749(18).

Jens, J., Kobylinski, L. (1982). *IMO activities in respect of international requirements for the stability of ships*. Segunda Conferencia internacional sobre estabilidad de los buques y vehículos oceánicos, STAB'82, Tokio.

Kobylinski, L. (1989): *Code of stability for all types of ships based on system approach*. Conferencia internacional PRADS 89, Varna (Bulgaria).

- Kobylnski, L. K., Kastner, S. (2003): *Stability and Safety of Ships. Vol I: Regulation and Operation. Elsevier Ocean Engineering Book Series, Vol.9, Elsevier.*
- Krappinger, O. and Sharma, S. D. (1974). *Sicherheit in der Schiffstechnik, Transactions STG, Vol. 68.*
- Nadeinski, V. P. and Jens, J. E. L. (1968). *Stability of fishing vessels, Transactions RINA.*
- Plaza, F., Petrov, A. A. (1986): *Further IMO activities in the development of international requirements for the stability of ships.* Tercera Conferencia internacional sobre estabilidad de los buques y vehículos oceánicos, STAB'86, Gdańsk.
- Plaza, F., Semenov, V. Y. (1990): *Latest work of the International Maritime Organization related to stability of ships.* Cuarta Conferencia internacional sobre estabilidad de los buques y vehículos oceánicos, STAB'90, Nápoles.
- Rahola, J. (1935). *The judging of the stability of ships, Transactions INA.*
- Rahola, J. (1939). *The judging of the stability of ships and the determination of the minimum amount of stability,* Ph.D. Thesis, Helsinki.
- Thompson, G. and Tope, J. E. (1970). *International considerations of intact stability standards, Transactions RINA, Vol. 112, pp. 43-67.*

3.5 Fundamentos del criterio de viento y balance intensos (criterio meteorológico)

3.5.1 Introducción

3.5.1.1 El criterio de viento y balance intensos (criterio meteorológico) es una de las disposiciones de carácter general del Código de Estabilidad sin Avería 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 apagado. En el caso de los buques que no tienen velocidad de avance, se da por entendido que están 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 que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas con mar de popa o de aleta" (MSC/Circ.707), situaciones en las cuales, al realizar determinadas operaciones, los buques están expuestos a un mayor riesgo de zozobra que con mar de través.

3.5.1.2 El criterio meteorológico hizo su primera aparición en los instrumentos de la OMI en el Documento adjunto 3 del Acta final del Convenio internacional de Torremolinos para la seguridad de los buques pesqueros, 1977. Durante las deliberaciones sobre la elaboración del Convenio de Torremolinos, se señaló la limitación del criterio de la curva 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 buque ni a otras 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 intensos, y se incluyeron directrices para el cálculo. Esta nueva disposición se basa en la norma japonesa de estabilidad para los buques de pasaje (Tsuchiya, 1975; Watanabe y otros, 1956).

3.5.1.3 Entonces, el criterio de la curva GZ para los buques de pasaje y de carga, resolución A.167(ES.IV), suscitó críticas similares en la OCMI. Se consideró que, como mucho, la resolución A.167(ES.IV) sería aplicable a los buques de eslora igual o inferior a 100 m debido a la limitación de datos estadísticos disponibles de la fuente. Por consiguiente, en la resolución A.562(14), adoptada en 1985, también 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 m. Este

nuevo criterio refleja en gran parte la norma de estabilidad japonesa para los buques de pasaje, pero utiliza la fórmula de cálculo de la URSS para el ángulo de balance. En cuanto a los buques pesqueros más pequeños, en 1991 se adoptó la resolución A.685(17) de la OMI. En esta resolución se introdujo el gradiente de velocidad del viento al aproximarse a la superficie del mar, en consonancia con la norma de la URSS. Al adoptarse en 1993, el Código de Estabilidad sin Avería mediante la resolución A.749(18), éste revocó todas las disposiciones indicadas anteriormente.

3.5.2 Método del equilibrio de energía

3.5.2.1 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. Pierrottet (1935) es uno de los pioneros en el estudio de este método de equilibrio de energía. Como se muestra en la figura 23, 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 provisionales de estabilidad de la URSS y, posteriormente, por Polonia, Rumania, la RDA y China (Kobylnski y Kastner, 2003).

3.5.2.2 En el Japón, el método de equilibrio de energía se amplió para incluir el movimiento de balance y para distinguir entre los vientos constantes y los vientos con ráfagas (véase la figura 24) y posteriormente se adoptó como principio básico de la norma nacional del Japón (Watanabe y otros, 1956). La regla del registro naviero de la URSS (1961) también utiliza el supuesto de un ángulo inicial de balance a barlovento (véase la figura 24). El criterio meteorológico actual de la OMI, que figura en el capítulo 2.3 de la parte A del Código de Estabilidad sin Avería, aplica el método de equilibrio de energía adoptado en el Japón casi sin modificarlo. Se asume 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 amortiguación 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 pueden 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 (Belenky, 1993).

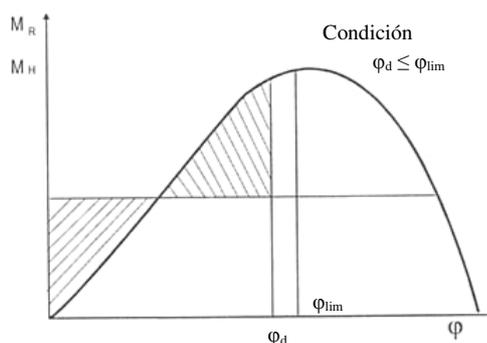


Figura 23: Método de equilibrio de energía utilizado por Pierrottet (1935)

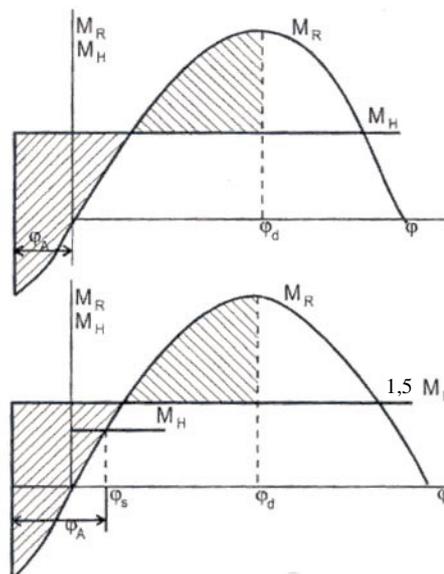


Figura 24: Métodos de equilibrio de energía según la norma de la URSS (figura superior) y la del Japón (Kobylinski y Kastner, 2003)

3.5.3 Momento de escora provocado por el viento

3.5.3.1 En la norma del Japón, el momento de escora constante (M_w) se obtiene aplicando la fórmula siguiente:

$$M_w = \frac{1}{2} \rho C_D A H_0 (H/H_0) V_w^2 \quad (1)$$

donde:

- ρ = densidad del aire;
- C_D = coeficiente 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; y
- V_w = velocidad del viento.

3.5.3.2 Los valores de 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 (Okada, 1952), 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 $C_D (H/H_0)$ de 1,22. La OMI también ha adoptado estas fórmulas y coeficientes.

3.5.3.3 Para representar vientos variables, se deberá determinar la intensidad de las ráfagas. En la figura 25 puede verse el coeficiente de ráfagas medido en varias condiciones tormentosas (Watanabe y otros, 1955). 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 figura 25, lo que resulta en un coeficiente de brazo adrizante de 1,5 para las ráfagas, como se estipula en el Código de Estabilidad sin Avería 2008.

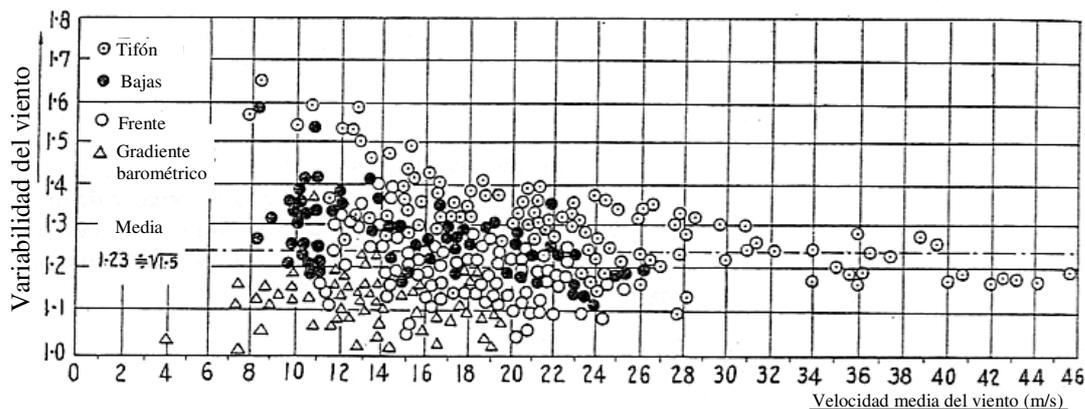


Figura 25: Medición de la variabilidad del viento marino (Watanabe y otros, 1956)

3.5.4 Ángulo de balance en las olas (método del Japón)

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 y 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 anulada por el momento de difracción del balance (Tasai y Takagi, 1969). 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 (φ , en grados) aplicando la fórmula siguiente:

$$\varphi = \sqrt{\frac{\pi r \Theta}{2N(\varphi N)}} \quad (2)$$

donde:

- Θ ($= 180s$) = pendiente máxima de la ola (en grados);
- s = peralte de la ola;
- r = coeficiente de pendiente efectiva de la ola; y
- N = coeficiente de amortiguación de balance de Bertin, que es una función de la amplitud del balance.

3.5.4.1 Peralte de la ola

Basándose en observaciones realizadas en el mar, Sverdrup y Munk (1947) encontraron una relación entre la edad de la ola y su peralte (véase la figura 26). La edad de la ola se define como la relación existente entre la celeridad de la ola (u) y la velocidad del viento (v); la altura de la ola (H_w) es la altura significativa de la ola. Si utilizamos la relación de dispersión de las olas $u = \frac{gT}{2\pi}$, este diagrama puede trasponerse a uno con el periodo de la ola (T) (véase la figura 27).

Por otra parte, como el buque experimenta un movimiento de balance en resonancia, es razonable suponer que el periodo de la ola es equivalente al periodo natural de balance del buque. Cabe señalar que el peralte de la ola obtenido depende del periodo de balance y de la velocidad del viento. Asimismo, debido al posible espectro de olas marinas, las regiones del peralte máximo y mínimo difieren de los datos originales.

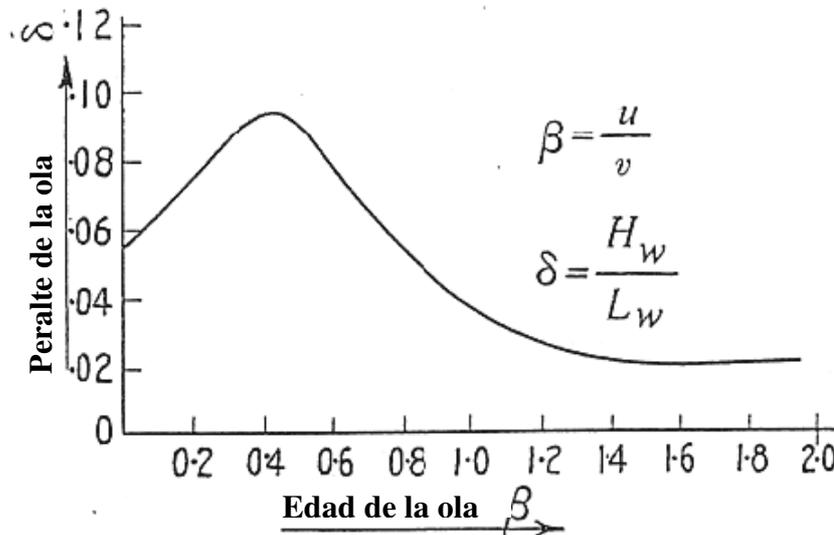


Figura 26: Relación entre la edad de la ola y su peralte (Sverdrup y Munk, 1947)

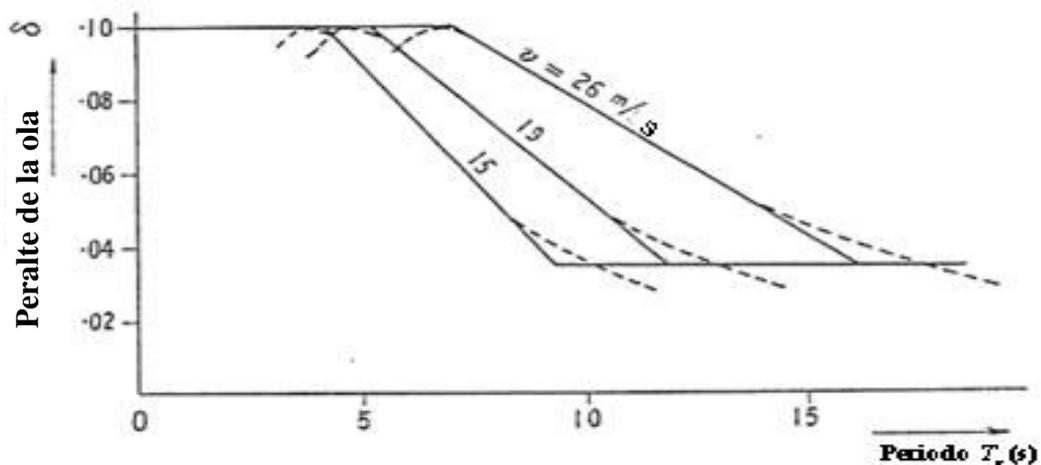


Figura 27: Relación entre el periodo de balance y el peralte de la ola según el criterio del Japón (Yamagata, 1959)

3.5.4.2 Coeficientes hidrodinámicos

Para utilizar la ecuación (2), es necesario estimar los valores de r y de N . Como se debe estimar el momento de excitación de la ola sin tener en cuenta la difracción de la ola debida al buque, éste puede obtenerse integrando la presión del agua estacionaria ejercida sobre el casco en aguas calmas. Watanabe (1938) aplicó este método a varios buques y obtuvo una fórmula empírica cuyas variables son longitud de onda, altura del centro de gravedad (VCG), altura metacéntrica (GM), manga, calado, coeficiente de bloque y coeficiente de área de la flotación. En aras de la simplicidad, para 60 buques existentes sólo se utilizan como variables la VCG y el calado (véase la figura 28). Este procedimiento se utilizó para obtener la fórmula de r empleada en el criterio meteorológico de la OMI.

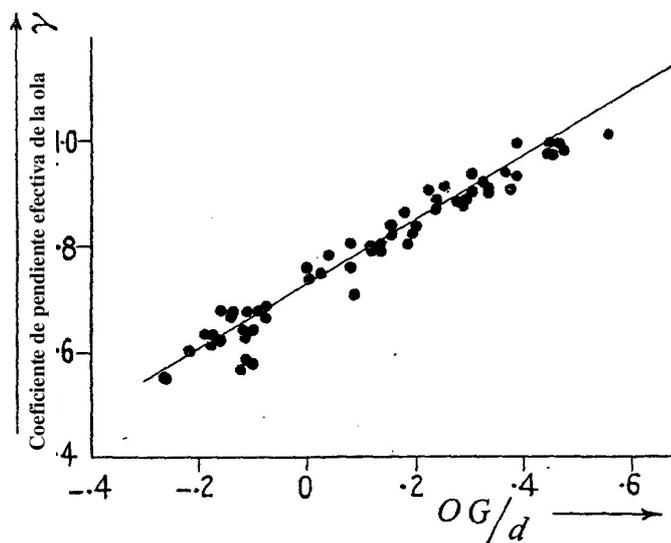


Figura 28: Coeficiente de pendiente efectiva de la ola (los valores medidos se señalan con puntos; la línea es la estimación) (Yamagata, 1959)

Para estimar el coeficiente N existen varias fórmulas empíricas. Sin embargo, según las normas de estabilidad del Japón, para los buques que tengan quillas de balance con un ángulo de balance de 20° se recomienda utilizar el valor $N=0,02$. En la figura 29 puede verse una confirmación de este valor (Matora, 1957).

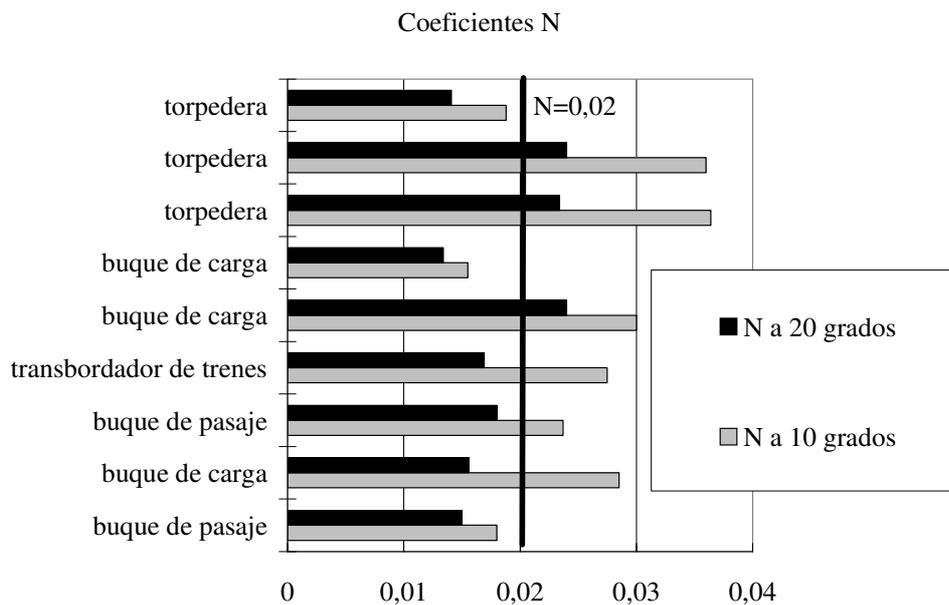


Figura 29: Ejemplo de coeficientes *N* medidos en experimentos con modelo

3.5.4.3 *Periodo natural de balance*

Para calcular el peralte de la ola, es necesario estimar el periodo natural de balance para un buque dado. En la norma del Japón, el valor medido en el buque se corrige con la fórmula empírica de Kato (Kato, 1956). Sin embargo, en el Subcomité STAB se consideró que este procedimiento consumía demasiado tiempo y se pidió al 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. Como puede verse en la figura 30, todos los datos de la muestra se encuentran comprendidos en un intervalo de error de $\pm 7,5 \%$ con respecto a la fórmula de Morita. De hecho, la desviación típica del error respecto de la fórmula es del $1,9 \%$. Por otra parte, el análisis de sensibilidad de *C* con la GM prescrita indicaba que un error en la estimación de *C* de hasta el 20% tiene como resultado un error del cálculo de la GM prescrita de tan sólo $0,04 \text{ m}$. En consecuencia, la OMI concluyó que esta fórmula puede utilizarse para el criterio meteorológico.

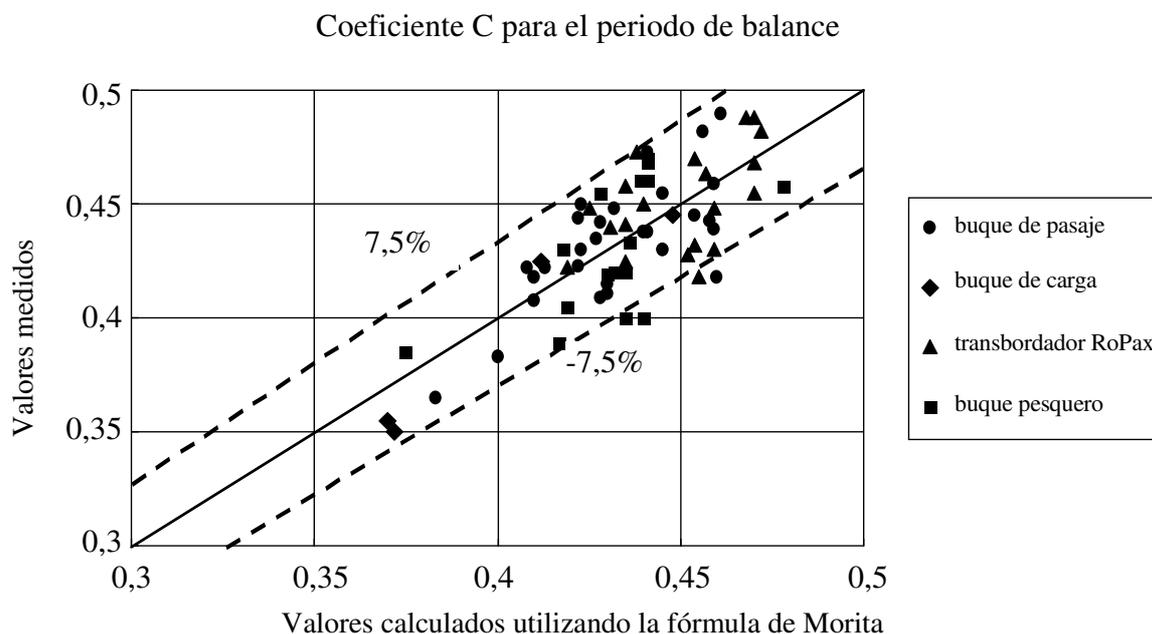


Figura 30: Precisión de estimación para la fórmula empírica del periodo de balance

3.5.4.4 Aleatoriedad de la ola

Si bien el peralte de la ola obtenido con el diagrama de Sverdrup-Munk se define en función de la altura significativa de las olas irregulares, la amplitud del balance de resonancia que se obtiene con la ecuación (2) viene formulada para olas regulares. A fin de salvar la distancia entre las dos, se comparó la amplitud del balance con olas irregulares de la misma altura significativa y periodo medio que las olas regulares, con la amplitud del balance de resonancia de las olas regulares. Como se muestra en la figura 31, si se toma la amplitud máxima de entre 20 y 50 ciclos de balance, se obtiene un factor de reducción de 0,7.

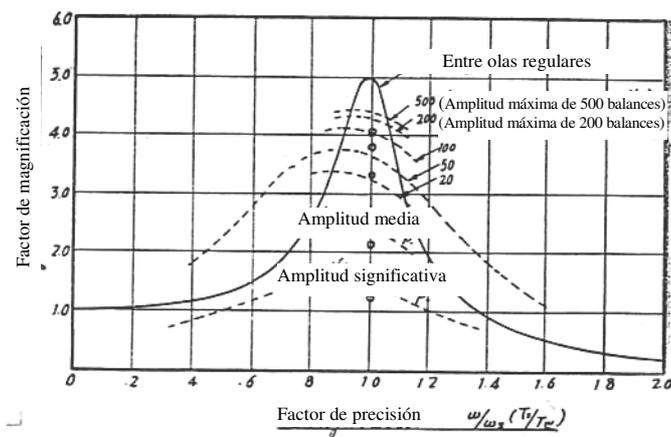


Figura 31: Comparación de amplitud del balance con olas regulares e irregulares (Watanabe y otros, 1956)

3.5.4.5 *Velocidad de viento de fuerza constante*

Como se explicó *supra*, el criterio meteorológico del Japón 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, el Japón llevó a cabo cálculos de prueba correspondientes a 50 buques, de los cuales 13 eran buques de altura (véase la figura 32). Utilizando estos resultados calculados, se determinó la velocidad del viento de fuerza constante para distinguir los buques que tienen una estabilidad inadecuada de otros buques. En otras palabras, en el caso de los buques con estabilidad inadecuada, el equilibrio de energía no deberá obtenerse utilizando el procedimiento mencionado *supra*. Como resultado, la velocidad del viento correspondiente a los buques de altura se determinó en 26 m/s. En este ejemplo se clasifican como insuficientemente seguros una torpedera hundida (0-12-I), un destructor hundido (0-13) y tres buques de pasaje de estabilidad inadecuada (0-3, 7 y 9), y se consideran seguros dos buques de carga, tres buques de pasaje y tres buques de pasaje de gran tamaño. Cabe señalar que la velocidad del viento de 26 m/s solamente se calculó a partir de estadísticas de siniestros correspondientes a buques y no se obtuvo directamente de las estadísticas reales del viento. La OMI también adoptó el valor crítico de velocidad del viento de 26 m/s. Si se sustituye $V_w = 26$ m/s en la ecuación (1), se obtiene la presión ejercida por el viento según el Código de Estabilidad sin Avería actual.

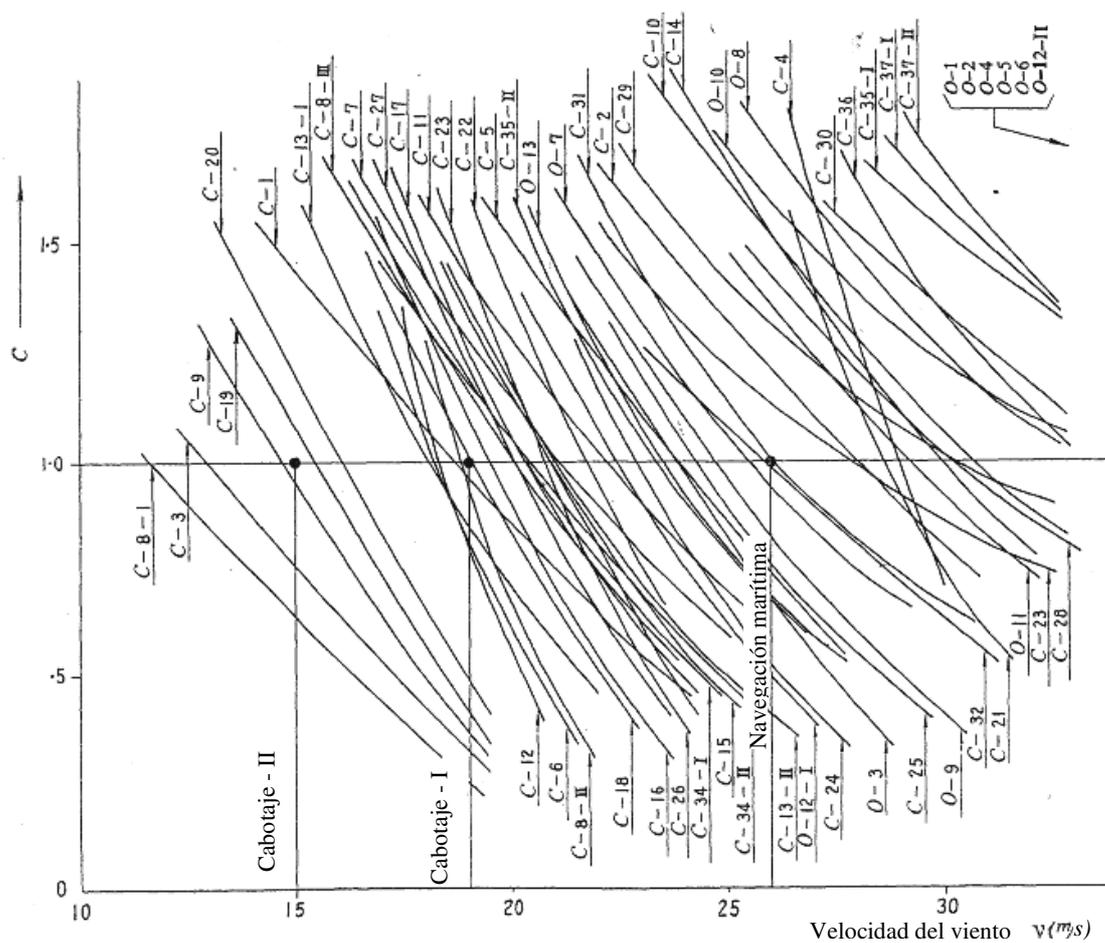


Figura 32: Resultados de los cálculos de prueba para determinar la velocidad del viento de fuerza constante; relación entre la velocidad del viento y el factor b/a para distintos buques de la muestra (Watanabe y otros, 1956)

3.5.4.6 *Balance con olas (método de la URSS)*

Según la norma de estabilidad de la URSS (URSS, 1961), la amplitud máxima de balance para 50 ciclos se estima del modo siguiente:

$$\varphi_R = kX_1X_2\varphi_A \tag{3}$$

donde k es una función de la superficie de la quilla de balance, X_1 es una función de B/d , X_2 es una función del coeficiente de bloque, y φ_A es la amplitud de balance del buque normal (véase la figura 33). Esta fórmula se elaboró mediante cálculos sistemáticos para una serie de buques utilizando la función de transferencia y el espectro de las olas (Kobylinski y Kastner, 2003).

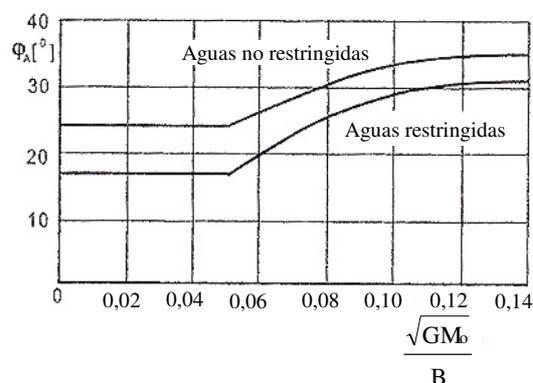


Figura 33: Amplitud media del balance según el criterio de la URSS (URSS, 1961)

Como se mencionó previamente, la OMI decidió utilizar parte de esta fórmula de balance de la URSS junto con el criterio del Japón. Ello se debe a que, a diferencia de la fórmula del Japón, la fórmula de la URSS depende de las formas de los cascos para estimar la amortiguación del balance. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$\varphi_1(\text{grados}) = C_{JR} k X_1 X_2 \sqrt{rs} \quad (4)$$

C_{JR} es un factor de precisión para mantener el nivel de seguridad del nuevo criterio al mismo nivel que la norma nacional del Japón. Para determinar este factor, los participantes de los Estados Miembros de un grupo de trabajo del Subcomité STAB llevaron a cabo cálculos de pruebas de las fórmulas del Japón y de fórmulas nuevas para muchos buques. Por ejemplo, el Japón (1982) llevó a cabo cálculos de prueba para 58 de los 8 825 buques de pabellón japonés de más de 100 toneladas de arqueo bruto existentes en 1980. Entre éstos se encontraban 11 buques de carga, 10 petroleros, dos quimiqueros, cinco gaseros, cuatro portacontenedores, cuatro buques para el transporte de automóviles, cinco remolcadores y 17 buques de pasaje o RoPax. Como resultado, la OMI concluyó que C_{JR} debería tener un valor de 109.

3.6 Referencias sobre el párrafo 3.5

- Belenky, V. L. (1993) *Capsizing Probability Computation Method*, *Journal of Ship Research*, 37(3): 200-207.
- Japan (1982) *Weather Criteria, Results on Japanese Ships*, SLF/7.
- Kato, H. (1956) *On a Method for Calculating an Approximate Value of the Rolling Period of Ships*, *Journal of Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 89.
- Kobylinski, L. K. y S. Kastner (2003) *Stability and Safety of Ships*, Elsevier, Oxford (Reino Unido), Vol. 1.
- Motora, S. (1957) *Ship Dynamics*, Kyoritsu Publications (Tokio).
- Okada, S. (1952) *On the Heeling Moment due to Wind Pressure on Small Vessels*, *Journal of Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 92: 75-81.
- Pierrottet, E. (1935) *A Standard of Stability for Ships*, *Transaction of the Institution of Naval Architects*, p. 208.
- Sverdrup, H. U. y W. H. Munk (1947) *Wind, Sea and Swell, Theory of Relations for Forecasting*, *Hydrographic Office Publication No. 601*.

- Tasai, F. y M. Takagi (1969) *Theory and Calculation Method for Response in Regular Waves, Seakeeping Symposium, Society of Naval Architects of Japan, p. 40.*
- Tsuchiya, T. (1975) *An Approach for Treating the Stability of Fishing Boats, Actas de la International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, University of Strathclyde, 5.3:1-9.*
- USSR (1961) *Standards of Stability of Sea-Going Vessels and Coasters, Register of Shipping of the USSR, Mosrskoi Transport, Moscú. También disponible en IMCO STAB/77, USSR (1979).*
- Watanabe, Y. (1938) *Some Contributions to the Theory of Rolling, Transaction of the Institution of Naval Architects, 80:408-432.*
- Watanabe, Y. et al. (1955) *Report of the Ocean Wind about Japan on the Naval-Architectural Point of View, Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 96: 37-42.*
- Watanabe, Y. et al. (1956) *A Proposed Standard of Stability for Passenger Ships (Part III: Ocean-going and Coasting Ships), Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 99: 29-46.*
- Yamagata, M. (1959) *Standard of Stability Adopted in Japan, Transaction of the Institution of Naval Architects, 101:417-443.*

CAPÍTULO 4: ORIENTACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL CÓDIGO DE ESTABILIDAD SIN AVERÍA

4.1 Criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes

En el caso de determinados buques, es posible que la prescripción incluida en el párrafo 2.2.3 de la parte A del Código no resulte viable. Dichos buques suelen ser de manga ancha y poco calado, con un cociente $B/D \geq 2,5$. Para ellos, las Administraciones pueden aplicar los criterios alternativos siguientes:

- .1 el brazo adrizante máximo (GZ) debería darse a un ángulo de escora no inferior a 15° ; y
- .2 el área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no debería ser inferior a 0,070 metro-radián hasta un ángulo de 15° , si el brazo adrizante máximo (GZ) se da a un ángulo igual a 15° , o de 0,055 metro-radián hasta un ángulo de 30° si el brazo adrizante máximo (GZ) se da a un ángulo igual o superior a 30° . Cuando el brazo adrizante máximo (GZ) se dé a un ángulo comprendido entre 15° y 30° , el área correspondiente bajo la curva de brazos adrizantes debería ser igual a:

$$0,055 + 0,001 (30^\circ - \varphi_{\max}) \text{ metro-radián.}^*$$

* φ_{\max} es el ángulo de escora, expresado en grados, en el que la curva de brazos adrizantes alcanza su valor máximo.