

EVALUACION

de la Estabilidad Transversal

Por

Claudio Dauré U.

Profesor del Depto. Construcción Naval de la Universidad Técnica del Estado (Valdivia). Ingeniero Ejecución en Construcción Naval, especializado en Arquitectura Naval en la Universidad de Glasgow, 1967-68.

El presente artículo se refiere a la inseguridad que tiene la tradicional práctica de evaluar la estabilidad transversal del buque. Brevemente se tratan los principales factores que determinan las características de la estabilidad intacta, la acción de las fuerzas perturbadoras y se exponen los principales criterios de estabilidad recomendados.

1. INTRODUCCION



SIEMPRE HA sido de vital importancia que el buque ofrezca la máxima seguridad en el mar. Un estudio sobre los naufragios ocurridos entre 1946 y 1957, realizado por

Mandel (Ref. 1) demostró que las pérdidas por falta de estabilidad alcanzaron a 82 % en los buques menores de 90 mts. de eslora. Esta información confirma, una vez más, la atención que merece el problema de la estabilidad transversal del buque.

Para evaluar la estabilidad transversal ha sido práctica usual juzgarla por medio de la altura metacéntrica inicial (GM), o sea, significa referirse a la magnitud de la distancia entre el centro de gravedad del desplazamiento del buque y el metacentro transversal, que se considera válido para las escoras de hasta 12°. La influencia que ejerce GM se manifiesta sensiblemente en el movimiento de balance transversal o rolo. Una pequeña altura metacéntrica produce oscilaciones lentas, incluso en las olas de mar gruesa, calificándose al buque como "suave" o "blando", característica que siendo confortable a bordo, produce en la tripulación un sentimiento de seguridad, pero que realmente pudiera no existir, y en

cambio, se encontrará el buque próximo a zozobrar por volcamiento. Sin embargo, un buque con mayor GM, calificado como "duro" por sus fuertes oscilaciones transversales, tampoco puede ofrecer completa garantía de seguridad, pudiendo adolecer de insuficiente estabilidad dinámica, como se ha podido comprobar en las investigaciones de naufragios de buques que poseían mayor GM que otros similares, que se encontraban navegando en la misma zona en que ocurrió el desastre. Esta situación, que presenta alternativas contradictorias, se conoce como la paradoja de la estabilidad.

Actualmente, se considera totalmente insuficiente tomar la altura metacéntrica como único parámetro para juzgar las condiciones de estabilidad de un buque y ya está generalmente establecido que todos los buques de alta mar deben ser provistos de curvas de estabilidad para las principales condiciones de carga y de navegación. En general las cualidades marineras del buque dependerán fundamentalmente de las características de su estabilidad transversal en agua calma, para los distintos estados de carga, que deberá ser satisfactoria para absorber los efectos de las fuerzas exteriores e interiores (acción del viento, olas, corrimiento de la carga, etc.) y de las fuerzas dinámicas causadas por los movimientos del buque durante la navegación (balance, cabeceo, arfada, etc.).

El estudio de las curvas de estabilidad estática constituye la base de los modernos criterios para evaluar la estabilidad del buque.

Antes de referirnos a los criterios de estabilidad y a los efectos de los momentos escorantes, revisemos las características principales de la estabilidad del buque intacto que constituye la base para iniciar el análisis de la estabilidad de cualquier buque.

2. CARACTERISTICAS BASICAS DE LA ESTABILIDAD INTACTA

Los resultados de los cálculos de estabilidad obtenidos por medio de alguno de los métodos conocidos (por integrador, método tabular, por computadoras, etc.) se presentan en un gráfico llamado "curvas transversales de estabilidad", en que se traza como ordenadas los brazos adrizantes relativos a una posición arbitraria "O" del centro de gravedad del buque, y como abscisas el rango de desplazamiento considerado. la fig. 1 muestra un ejemplo típico de "curvas transversales de estabilidad" o "curvas de estabilidad isoclina".

Así, las curvas que se obtienen son para ángulos de inclinación constante y para desplazamientos variables que dependen sólo de la forma del casco y, por lo tanto, se utilizan para toda la vida del

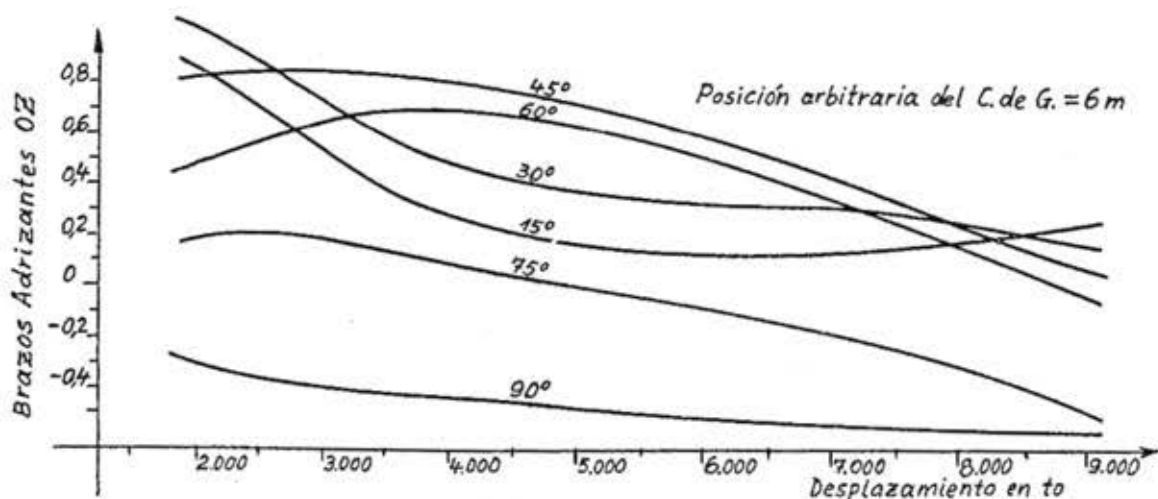


FIG. 1

buque. Para obtener los brazos adrizantes reales GZ para cualquier desplazamiento dado estando conocida la posi-

$$GZ = OZ - OG \operatorname{Sen} \theta$$

$$GZ = OZ + OG \operatorname{Sen} \theta$$

ción vertical del centro de gravedad se deberá sólo efectuar la corrección por la posición diferente de G, o sea, se tiene:

cuando G es mayor que O

cuando G es menor que O

De este modo se obtienen los brazos adrizantes para un desplazamiento requerido en función de los ángulos de escora, cuya representación gráfica, como se

muestra en la Fig. 2, se denomina "Curva de Estabilidad Estática" o también "Curva de Brazos Adrizantes".

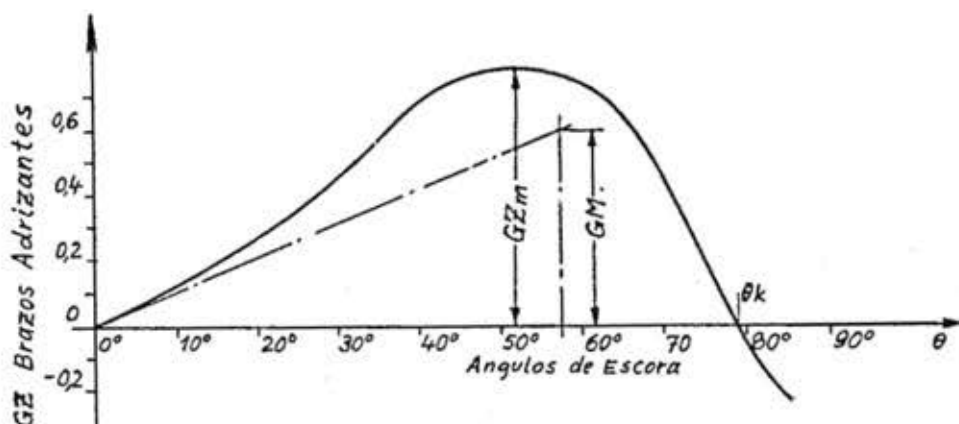


FIG. 2

La curva de estabilidad estática tiene la importancia de representar las características básicas de la estabilidad transversal intacta. En ella se distinguen las siguientes características:

- Estabilidad Inicial, en que los brazos adrizantes, para pequeños ángulos de escora, corresponden a la tangente de la curva en el origen y está dada por la altura metacéntrica GM cuando el ángulo es un radián ($57,3^\circ$).
- Brazo Adrizante Máximo GZ_m , que es proporcional al mayor momento escorante que el buque puede soportar. Al ángulo en el cual ocurre se le llama ángulo de inclinación crítica.
- Alcance o rango de Estabilidad, determinado por el ángulo de estabilidad nula θ_k , en que el valor de GZ se reduce a cero.
- Ángulo de Inmersión de la Cubierta, que corresponde aproximadamente al punto de inflexión de la curva.

- Estabilidad Dinámica, o sea, la capacidad del buque para absorber la energía impuesta por las fuerzas perturbadoras. Está dada por el área bajo la curva multiplicada por el desplazamiento correspondiente.

3. ACCION DE LAS FUERZAS ESCORANTES

En el estudio de la estabilidad deberán tomarse en cuenta los efectos de las causas perturbadoras provenientes de la acción de agentes externos o inherentes al propio buque, bajo las condiciones de servicio y navegación en el mar. Las fuerzas escorantes pueden estimarse por cálculo y su acción se expresa por los momentos escorantes, que se trazan también en función de los ángulos de inclinación, de modo que se representan en el gráfico de los momentos adrizantes, que a su vez corresponden a la misma curva de estabilidad o de brazos adrizan-

tes debido a que el desplazamiento se considera constante en cada situación que se analiza. A continuación se tratan las principales acciones perturbadoras que afectan a la estabilidad transversal:

3.1 Acción del viento

La acción del viento puede llegar a ser considerable, especialmente en barcos con alto francobordo o grandes superestructuras.

El momento provocado por el viento a un barco en posición adrizada es:

$$M_w = \frac{\rho_a}{2} \cdot v_w^2 \cdot A \cdot l \cdot \xi_w$$

ρ_a = densidad del aire = (0,125 Kgs²/m⁴)

v_w = velocidad del viento. Para Beaufort, 6, 8, 10, 12 significa aproximadamente 12, 18, 25, 30 m/s. respectivamente.

Se han registrado velocidades de hasta 115 nudos (60 m/s.).

A = área lateral incluyendo superestructuras y aparejos expuestos al viento.

l = distancia entre el centro de presión del viento y el centro de presión del agua.

ξ_w = coeficiente de presión del viento, alrededor de 1,3.

El momento escorante variará con el ángulo de inclinación debido al cambio del área en que actúa, proyectada en el plano vertical, y a la separación vertical de los centroides de presión del viento y del agua con el casco. Experimentalmente los valores medidos se expresan en función del ángulo de escora en la fórmula aproximada:

$$f(\theta) = 0,25 + 0,75 \cos^3 \theta$$

Entonces el brazo escorante por presión del viento es:

$$GZ_w = \frac{M_w}{\Delta} f(\theta)$$

La curva de brazos escorantes se grafica sobre la curva de estabilidad estática del barco. El diagrama tiene igual presentación utilizando los momentos que poseen realmente significado físico como se muestra en la Fig. 3.

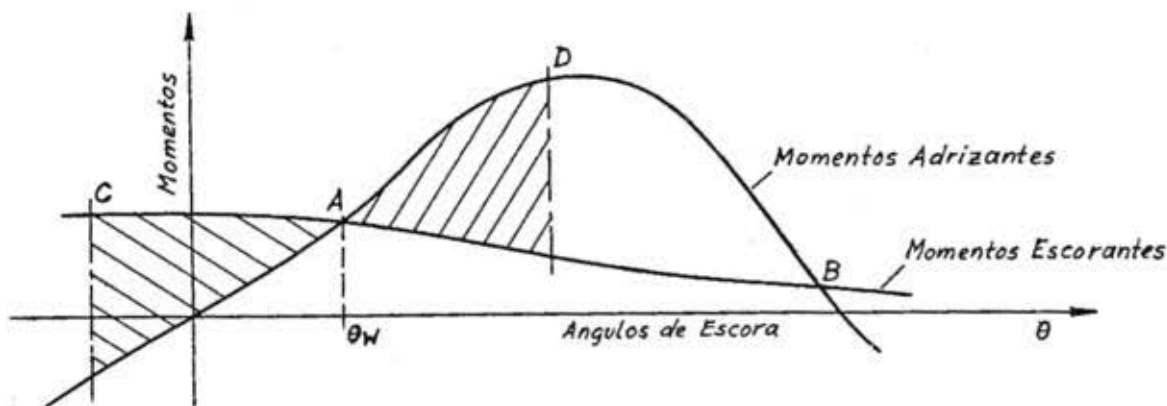


FIG. 3

En los puntos A y B el momento escorante iguala al momento adrizante y el ángulo θ_w es el ángulo de escora que tendría el barco si la presión del viento fuera constante. La diferencia vertical entre ambas curvas representa el momento que actúa en ese ángulo. También se observa en este caso que el rango de estabilidad positiva ha disminuido hasta B.

Si el barco está escorado en el punto A, una inclinación hacia cualquier banda

generará un momento tendiente a devolverlo a la posición A, o sea, ocurre balance. Suponiendo que el barco ha tenido un balance a babor (izquierda) al ángulo C, el área entre las curvas entre C y A, menos la energía absorbida por la resistencia del agua, corresponde a la energía impartida al barco y que actuará como energía cinética para el balance a través del punto A, llevando al buque a un ángulo D tal que el área entre las curvas desde A hasta D sea equivalente

a la energía cinética en el punto A menos la energía absorbida por el agua entre A y D.

Si el área entre ambas curvas desde A hasta B (Denominada Estabilidad Dinámica Residual) no es suficiente para absorber esa energía, el barco balanceará traspassando el punto B y se volcará. En consecuencia, debería asegurarse que dicha área sea mayor, por algún margen, que el área entre las curvas desde A hasta C.

3.2 Acción de las olas

Es la más importante de las acciones que puede poner en peligro al buque. Especial atención merecen las olas transversales al rumbo del buque que ocasionan el movimiento de balance o rolo, llegando a ser particularmente peligroso en el caso de sincronismo.

También la estabilidad transversal, calculada para aguas tranquilas, puede verse seriamente afectada por la influencia de olas longitudinales con mar de popa, especialmente cuando el largo de ola iguala a la eslora del buque. En este caso, en la condición de quebranto se produce una disminución de GZ, debido a que decrece el momento de inercia del plano de flotación en los extremos; simultáneamente también contribuye a deteriorar la estabilidad el denominado "efecto Smith" al disminuir el valor del empuje en la zona central cuando la cresta de la ola se encuentra en mitad de la eslora.

El caso más desfavorable que se puede presentar es cuando el barco recibe mar por la aleta, debido a que en esta situación podría resultar una combinación de los efectos indicados. Al respecto se puede observar que el aumento en el francobordo es el mejor recurso para contrarrestar la pérdida de estabilidad por causa de las olas.

Los problemas que determinan las características de la estabilidad bajo condiciones dinámicas en el mar aún permanecen insuficientemente investigados, a pesar de los avances obtenidos, tanto en trabajos teóricos como experimentales desarrollados en los últimos 20 años. Estas materias pertenecen propiamente al estudio del Comportamiento del Buque en el Mar (Seakeeping). Una importante

contribución a estos esfuerzos ha sido aportada por la U.S. Coast Guard, que actualmente se encuentra abocada a desarrollar un programa de simulación por computador, en los seis grados de libertad, para predecir el volcamiento en el mar (Ref. 2).

3.3 Efecto de la Superficie Libre de Cargas Líquidas

La existencia a bordo de tanques parcialmente llenos con líquidos, provocan una considerable reducción de los brazos adrizantes. La corrección por efecto de la superficie libre se puede obtener considerando que causaría una elevación del centro de gravedad del buque G al punto G_1 que pasa a ser el "centro de gravedad virtual del buque" y es igual a:

$$GG_1 = \frac{I \cdot \gamma_i}{\Delta}$$

siendo

I = momento de inercia de la superficie libre

γ_i = peso específico del líquido

Δ = desplazamiento del buque
entonces,

$$GM \text{ corregido} = GM - \frac{I \cdot \gamma_i}{\Delta}$$

$$GZ \text{ corregido} = GZ - \frac{I \cdot \gamma_i}{\Delta} \cdot \sin \theta$$

3.4 Corrimiento de la carga

El corrimiento de la carga ha sido en muchas ocasiones la causa de naufragios de buques. En la Convención Internacional de SOLAS de 1960 (Ref. 3), en el capítulo VI se recomienda la adopción de todas las precauciones necesarias para evitar el corrimiento de la carga. Para el cálculo de los momentos escorantes se supone un ángulo de 15 grados para la superficie de granos. En 1968, el Sub-Comité para la Subdivisión y Estabilidad ha acordado el siguiente criterio para buques graneleros mayores de 500 TG:

- El ángulo de escora debido al corrimiento de granos no será mayor que 12 grados;
- En la curva de estabilidad estática, la estabilidad dinámica residual hasta el ángulo de escora de máxima di-

ferencia entre las ordenadas de ambas curvas, 40 grados o el ángulo de inmersión de la cubierta cualquiera sea el menor, será en todas las condiciones no menor que 0,075 (m. rads.);

- c) La altura metacéntrica inicial, después de las correcciones por efectos de superficies libres, no será menor que 0,30 m.

3.5 Efecto del movimiento de un peso

El momento escorante producido por el movimiento de un peso a bordo o por un peso que se embarca o desembarca, sin considerar el efecto del movimiento vertical, por ser pequeño, es

$$\text{Brazo escorante} = \frac{w \cdot h \cdot \cos \Theta}{\Delta}$$

y el nuevo brazo adrizante es:

$$G_1 Z_1 = G - \frac{W \cdot h \cdot \cos \Theta}{\Delta}$$

en que:

W = peso trasladado

h = distancia transversal a la crujía

Δ = desplazamiento incluyendo el peso.

La capacidad y distribución de plumas o grúas de carga debe elegirse de modo que el ángulo de escora producido permita sin dificultad efectuar la operación de carga o descarga. Según Norrby (Ref. 4) esta inclinación fluctúa de 1° a 6°. Para este caso la estabilidad requerida puede expresarse:

$$GM \geq \frac{m_1}{\Delta \cdot \tan \Theta_1}$$

siendo

m_1 = momento máximo de operación

Θ_1 = ángulo de escora admisible (1° a 6°).

Δ = desplazamiento.

3.6 Agrupamiento de pasajeros a una banda

Para este caso tiene validez la misma fórmula dada para el movimiento de pesos siendo:

W = peso de los pasajeros

h = distancia desde la crujía al centro de gravedad de los pasajeros.

Según recomendación de IMCO, el ángulo de escora por agrupamiento de los pasajeros a una banda no debe exceder de 10 grados.

3.7 Efecto del movimiento de evolución

Cuando evoluciona el barco adrizado actúa el siguiente momento:

$$M_t = \frac{\Delta \cdot v^2 \cdot l}{g \cdot R}$$

resultando del par debido a la fuerza centrífuga $\frac{m \cdot v^2}{R}$ y la reacción por

la presión del agua, siendo:

Δ = desplazamiento del buque

g = aceleración de gravedad

v = velocidad periférica

R = radio del círculo de evolución

l = distancia vertical entre el centro de gravedad de la fuerza centrífuga y de la fuerza de reacción del agua.

Los brazos escorantes se pueden obtener con la fórmula aproximada:

$$GZ_t = \frac{v^2}{g \cdot R} \left(KG - \frac{T}{2} \right)$$

KG = altura del centro de gravedad del buque desde la quilla

T = calado correspondiente.

Según pruebas efectuadas con numerosos barcos se ha demostrado que el momento no es máximo en pequeños círculos de evolución debido a la reducción de la velocidad, en cambio se ha encontrado, que el momento máximo ocurre en un círculo de diámetro aproximado a 4 veces la eslora del buque siendo la velocidad periférica alrededor de $\frac{3}{4}$ de la velocidad de navegación.

Se observa que el factor velocidad interviene predominantemente, de modo que el momento escorante por efecto del movimiento de evolución es especialmente importante en barcos rápidos.

FIG. 4

sigue, considerando la navegación en el mar con viento y olas.

Cuando un barco escora a un ángulo θ_0 grados por la acción de un viento de presión constante, Dw , queda en disposición de adquirir balance por acción de las olas en torno a ese ángulo θ_0 . Al producirse un balance síncrono el barco alcanzará un ángulo máximo θ_1 hacia la banda de donde proviene el viento. Si sopla una ráfaga repentina desde la misma dirección, el barco balanceará mucho más llegando al ángulo θ_2 sobre la banda escorada hasta que el área $K'HF = \text{área } K'B'A'$.

El momento o brazo escorante de las ráfagas en las cercanías del Japón es aproximadamente 1,5 veces la del viento constante (Dw). Por lo tanto, si área $K'HF = a$ y $K'C'A' = b$ medidas en el

diagrama, y $C = \frac{b}{a} > 1$ el barco se

puede considerar a salvo de zozobrar por falta de estabilidad.

4.3 Normas de la Marina de Estados Unidos (Ref. 8)

Este criterio se refiere esencialmente a la altura metacéntrica, máximo GZ y estabilidad dinámica. Se fundamenta en el hecho que si un barco soporta perfectamente un momento escorante en agua calma se consideraría suficiente si la curva de estabilidad estática tiene un brazo en exceso del correspondiente al momento escorante.

Por efecto de la acción del viento y olas se debe satisfacer las siguientes condiciones; considerando la Fig. 5:

GZ en el ángulo θ_0 no mayor que $0,6 \cdot GZ$ máximo.

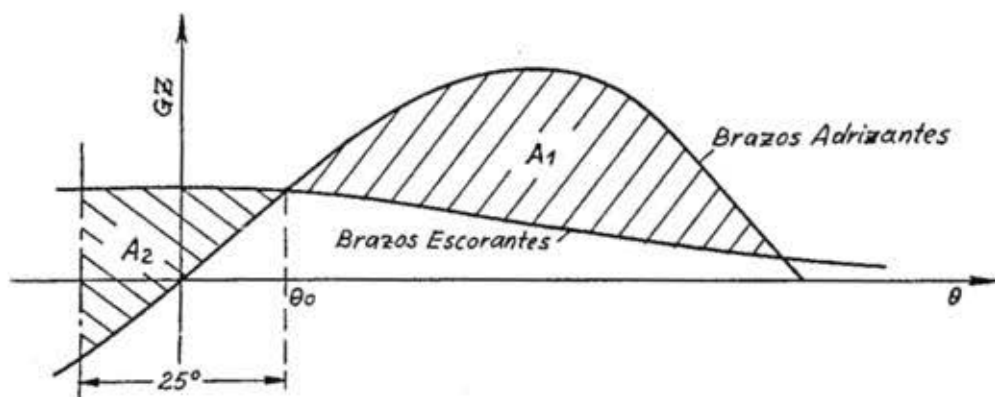


FIG. 5

Área A_1 mayor que $1,4 \cdot$ área A_2 en que se ha considerado un balance arbitrario de 25 grados hacia barlovento.

Para los efectos de momentos escorantes de pesos se indica lo siguiente: GZ para el ángulo θ_0 no mayor que $0,6 \cdot GZ$ máximo.

θ_0 no mayor que 15° .

Área A_1 (estabilidad dinámica residual) no inferior al 40% del área total bajo la curva de brazos adrizantes.

Este mismo criterio se establece al considerar el momento de escora debido a la evolución del buque.

4.4 Criterio recomendado por IMCO.

Las siguientes recomendaciones principales han sido aprobadas por IMCO en 1968 (Ref. 9) para un criterio de estabilidad intacta aplicable a pesqueros y buques de carga y pasajeros menores de 100 mts. de eslora:

- El área bajo la curva de brazos adrizantes no debería ser menor que $0,055$ metro-radianes hasta la escora de 30° y no menor que $0,09$ m. radianes, hasta la escora de 40° o hasta el ángulo en que comienza la

inundación por las aberturas no estancas del casco y superestructuras si éste es menor.

Además, el área bajo la curva de brazos adrizantes entre ángulos de escora de 30° y 40° (o el ángulo en que comienza la inundación si es menor) deberá ser mayor que 0.03 metros-radianes.

- b) El brazo adrizante GZ será no inferior a 0,20 m. para un ángulo de escora igual o mayor de 30° .
- c) El brazo adrizante máximo debería ocurrir en un ángulo de escora que preferiblemente exceda 30° pero no inferior a 25° .
- d) La altura metacéntrica inicial GM no será menor que 0,15 m. para buques de pasajeros y buques de carga, o 0,35 m. para pesqueros.

5. CONCLUSIONES

En la evaluación de la estabilidad transversal deberá considerarse, en primera instancia, la incidencia de los factores de forma del casco, la acción de las fuerzas perturbadoras y los efectos de las fuerzas dinámicas del buque en el mar, factor, este último, que hace particularmente complejo el problema.

Aunque los diversos criterios de estabilidad propuestos no pueden considerarse completamente satisfactorios para ga-

rantizar la seguridad de navegación en cualquier condición de servicio, la adopción de un criterio razonable para el estudio de la estabilidad y su consecuente utilización a bordo, contribuirá, indudablemente, a mejorar la seguridad en el mar.

6. REFERENCIAS

- 1.—C. Manley: "Losses of Small Ships", RINA, vol. 100, 1958.
- 2.—D.M. Bovet, Johnson and Jones: "Recent Coast Guard Research into Vessel Stability", Marine Technology, Oct. 1974.
- 3.—International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1960.
- 4.—R. Norrby: "Stability Problems of Coastal Vessels", International Shipbuilding Progress, September 1964.
- 5.—W. Garzke, Johnson and Landsburg: "Trim, Stability, and Loading Manuals: A Survey of Needs, Uses, and Improvements", SNAME, vol. 82, 1974.
- 6.—J. Rahola: "The Judging of the Stability of Ships", Helsinki, 1939.
- 7.—M. Yamagata: "Standard of Stability adopted in Japan", RINA, vol. 101, 1959.
- 8.—T. Sarchin and L. Goldberg: "Stability and Buoyancy Criteria for U.S. Naval Surface Ships", SNAME, vol. 70, 1962.
- 9.—G. Thomson and J. Tope: "International Considerations of Intact Stability Standards", RINA, vol. 112, 1970.

