

ESTABILIDAD TRANSVERSAL DE BUQUES PESQUEROS CON TRIMADO LIBRE

Lenin J. C. Valerio Mena, Claudio A. Rodríguez Castillo
Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería

RESUMEN

Gran parte de los accidentes con embarcaciones pesqueras se deben a problemas de estabilidad transversal durante la faena de pesca, en la cual la embarcación se escora grandes ángulos, y muchas veces al no lograr recuperarse, zozobra. En los estudios y peritajes llevados a cabo por las Aseguradoras generalmente se llega a la conclusión de que la embarcación superó su límite de estabilidad. Este límite de estabilidad en algunos casos puede no haberse evaluado correctamente. En este trabajo se discute la eficiencia del cálculo de estabilidad estática transversal usado en el diseño de buques y embarcaciones pesqueras de la flota peruana, basados en los diagramas de curvas cruzadas de estabilidad tradicionales. La discusión se basa en la restricción que es impuesta por el método de cálculo tradicional que condiciona el trimado de la embarcación a permanecer inalterado. Los cálculos realizados por el método tradicional son comparados con otros realizados utilizando un método de cálculo con trimado libre, basado en el concepto del equilibrio hidrostático de cuerpos flotantes. Se presenta el método de cálculo con trimado libre incluyendo un caso ilustrativo.

ABSTRACT

Most of fishing vessels' accidents are caused by transverse stability problems during fish catch operation, which makes the vessel heels large angles and most of the times when it cannot restore its upright position, it capsizes. As showed in studies and surveys carried out by Insurance Companies, they conclude that the vessel overpassed its stability limit. This limit sometimes has not been evaluated correctly. In this paper, we discuss the efficiency of the static stability calculation method used in the design of peruvian ships and fishing vessels, which is based on the traditional cross curves of stability. The discussion refuses the restriction imposed by the traditional calculation method that keeps the ship's trim fixed while heeling it. Calculations made by the traditional method will be compared with those made using the free trim method, based on hydrostatic equilibrium of floating bodies.

The free trim calculation method is described and an illustrative example is discussed.

INTRODUCCION

Es sabido que independiente del margen de estabilidad estática considerado en el diseño de las embarcaciones convencionales, el riesgo de naufragio está siempre presente. Naturalmente las embarcaciones de pequeño y medio porte son más vulnerables a las condiciones ambientales, ya que casi siempre navegan en condiciones de mar adversas dada la relación de grandeza entre el buque y la ola. Los barcos pesqueros, tanto por sus dimensiones como por el modo de operación, son embarcaciones de alto riesgo de volcamiento (zozobra).

El problema de garantizar una estabilidad adecuada históricamente ha sido abordado de forma "evolucionaria", utilizando la experiencia de servicio de navíos construidos como la principal base de in-

formaciones para estimar el comportamiento del navío y su interacción con el mar. En ese sentido quizás la contribución más importante haya sido la tesis de doctorado de Rahola (1939), que dio origen a discusiones y nuevas aproximaciones que convergieron para los actuales criterios de estabilidad establecidos por la Organización Marítima Internacional (IMO) [1]. El estudio de Rahola fue basado en el resultado oficial de 34 investigaciones de naufragios. En ese estudio fueron analizadas las características de restauración hidrostática de los navíos accidentados, las que fueron comparadas con las de los navíos en servicio, estableciéndose valores mínimos de brazos de restauración para garantizar la seguridad del buque en el mar.

Los Criterios de Estabilidad de la IMO.

Los criterios de estabilidad establecidos por la Organización Marítima Internacional (IMO) para buques pesqueros se refieren básicamente a los parámetros de la curva de brazo de restauración y pueden ser resumidos en la siguiente forma:

Criterio IMO	Unidades	Mínimo Requerido
Área entre 0° y 30°	m x grado	3,15
Área entre 0° y 40° ó ϕ_a (si $\phi_a < 40^\circ$)	m x grado	5,16
Área entre 30° y 40° ó ϕ_a (si $\phi_a < 40^\circ$)	m x grado	1,719
GZ a 30° ó más	m.	0,2
Angulo de GZ máx.	grado	25°
GM	m.	0,35

Donde: ϕ_a es el ángulo de escora donde se inicia la inundación del barco. GM es la altura metacéntrica transversal y las áreas son las encerradas bajo la curva de brazos adrizantes GZ. (ver figuras 1 y 2)

A pesar de que los criterios actuales de estabilidad de la IMO sean el producto de muchas décadas de experiencia, la concepción del método, en esencia estática, no es absolutamente suficiente para garantizar la seguridad de los buques en olas. No obstante, actualmente representan una manera práctica de evaluar la estabilidad de los buques.

Antes de que el criterio de estabilidad del buque pueda evaluarse, el diseño del buque debe considerar los requerimientos de ese criterio, y la estabilidad debe ser evaluada de la forma más exacta posible. Es en ese aspecto que los métodos tradicionales, que deben su credibilidad a una extensiva experiencia con buques cargueros convencionales, pueden ofrecer resultados poco exactos para buques de formas especiales, como es el caso de los buques pesqueros.

La Curva de Brazo de Restauración (GZ).

En esencia el cálculo de la estabilidad es hecho considerando una dupla de fuerzas constituidas por el peso y el empuje. Esta dupla de fuerzas representa el momento que el buque desarrolla, si es estable, para retornar a su posición adrizada, cuando es sacado de su posición de equilibrio (la posición adrizada).

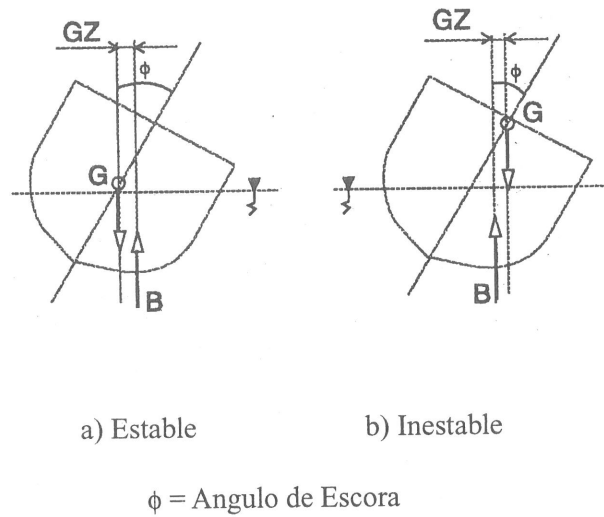


Fig. 1 Estabilidad del buque

La fuerza de empuje B para efectos de estabilidad puede ser considerada actuando en el centroide del volumen sumergido, pues a pesar de no actuar específicamente en ese punto, su línea de acción, que es vertical, pasa por el centroide del área sumergida. De forma similar, el peso del buque puede ser considerado actuando en su centro de gravedad.

Cuando el buque flota en equilibrio, en la posición adrizada o en una posición escorada, las magnitudes de esas fuerzas son iguales. La distancia transversal entre las líneas de acción es llamada "brazo de restauración" y es función del ángulo de escora. Para el buque en la posición adrizada, el brazo de restauración (GZ), es nulo.

Cuando el buque se escora un determinado ángulo, la forma sumergida de este cambia de forma, consecuentemente el centro de empuje se desplaza generando un momento de restauración. El cambio en la posición del centro de empuje en respuesta al ángulo de inclinación es determinado principalmente por la forma del casco del buque. En la mayoría de los buques la forma sumergida cambia para cada ángulo de inclinación. El objetivo central del cálculo de la estabilidad es entonces determinar la posición del centro de empuje de la forma sumergida del buque para diferentes ángulos de escora, en una condición de carga determinada.

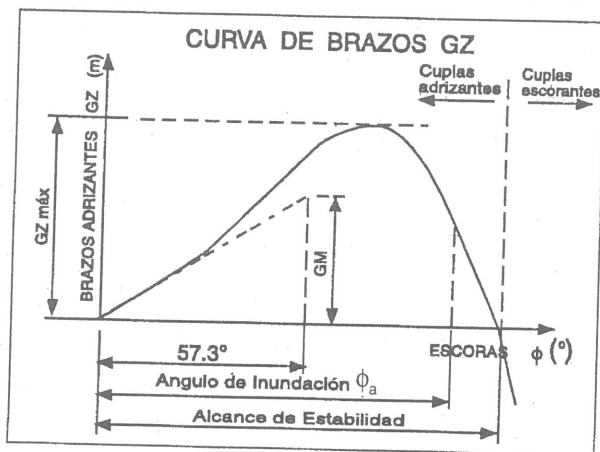


Fig. 2 Curva típica de Brazos de Restauración GZ.

Influencia del Trimado en la Estabilidad.

En el cálculo convencional de estabilidad las características de restauración del buque son realizadas en dos etapas. La primera etapa comprende el cálculo de las llamadas curvas cruzadas de estabilidad que representan los valores de los brazos adrizantes para cada ángulo de inclinación en función del desplazamiento, considerando la posición del centro de gravedad en la quilla del buque. Este cálculo tradicionalmente se realiza considerando una rotación en torno de un eje longitudinal fijo al casco del buque que se mantiene paralelo al plano de flotación, consecuentemente, los demás movimientos del buque son restringidos. La segunda parte envuelve la interpolación de los valores de la curva de brazo adrizante de las curvas cruzadas, para una determinada condición de desplazamiento, y la corrección de estas para la posición del centro de gravedad.

En la condición inclinada existe una diferencia entre las formas de proa y popa, consecuentemente existe una diferencia entre la posición longitudinal del centro de empuje del buque en la posición escorada y la posición longitudinal del centro de empuje en la condición adrizada, la que coincide con la posición del centro de gravedad. Como el centro de gravedad del buque permanece inalterado durante la escora, la diferencia entre la posición longitudinal del centro de empuje del buque escorado y el centro de gravedad inducirá un trimado en el buque, modificando la forma sumergida del buque para atender la condición de equilibrio hidrostático, de forma que la línea

de acción del empuje en la condición escorada coincide con la línea de acción del peso. Consecuentemente, la determinación de la posición de equilibrio para un cuerpo flotando en aguas calmas requiere información acerca del peso, centro de gravedad y su geometría [2,3].

La Estabilidad con Trimado Libre.

Para el efecto se escogen dos sistemas de coordenadas de forma que el sistema $X_oY_oZ_o$ es móvil, y permanece fijo al buque con el eje X_o en la dirección de popa proa, y el segundo sistema de referencia XYZ es fijo, donde el plano XY es paralelo al plano de flotación con el eje Z apuntando hacia arriba. En la posición de equilibrio adrizada, ambos sistemas coinciden. La Fig. 3 muestra los dos sistemas de referencia.

Las coordenadas del sistema local pueden expresarse en el sistema global utilizando la siguiente transformación:

$$\begin{aligned} x &= x_o \cos\phi + y_o \sin\phi \cos\theta - z_o \sin\phi \cos\theta \\ y &= y_o \cos\theta + z_o \sin\theta \\ z &= x_o \sin\theta - y_o \cos\phi \sin\theta - z_o \cos\phi \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

Donde, los ángulos de escora y trimado son denotados por, ϕ y θ respectivamente. El calado T representa la traslación del sistema fijo en el cuerpo en la dirección positiva del eje z , pero no necesariamente el calado de proyecto. El calado T depende de cómo se escoge el sistema de referencia. La posición de equilibrio es obtenida a partir de las tres condiciones de equilibrio:

$$\begin{aligned} F_1 &= M - \rho V = 0 \\ F_2 &= X_g M - \rho L_x = 0 \\ F_3 &= Y_g M - \rho L_y = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$$L_x = \int_{\nabla} x dV \quad L_y = \int_{\nabla} y dV \quad L_z = \int_{\nabla} z dV$$

La resultante de la fuerza en la dirección del eje Z es denotada por F_1 y los momentos resultantes en torno de los ejes X e Y denotados por F_2 y F_3 respectivamente. Las coordenadas del centro de gravedad $(x,y)_g$ son con respecto al sistema global. El volumen

sumergido es denotado por ∇ , M la masa, ρ densidad de masa del fluido y los momentos de volumen L_x , L_y y L_z .

Como la posición del peso y del centro de gravedad son conocidos, las condiciones de las ecuaciones (2) son funciones de (T, θ, ϕ) solamente y asumiendo F_1 , F_2 y F_3 diferenciales.

Las expresiones de las fuerzas y momentos pueden ser expandidas en series de Taylor en torno de la posición de equilibrio (T, θ, ϕ) , así:

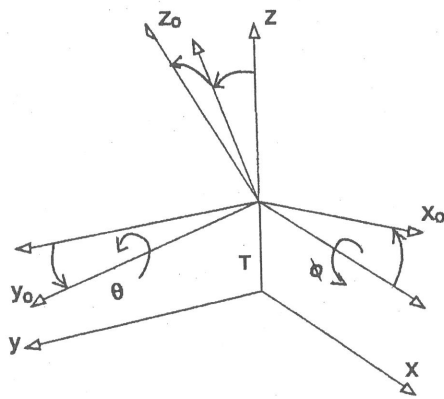


Fig. 3 Sistema de referencia.

$$F(T, \theta, \phi) = F_0 + \left. \frac{\partial F}{\partial T} \right|_1 (T - T_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial \phi} \right|_1 (\phi - \phi_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial \theta} \right|_1 (\theta - \theta_0) + \dots \quad (3)$$

Considerando los términos de la expansión en series de Taylor hasta el primer orden, la primera estimación de la posición (T, θ, ϕ) puede ser obtenida. Así, según la ecuación (3) la primera aproximación para atender las condiciones en la ecuación (2) puede ser estimada mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial T} & \frac{\partial F_1}{\partial \theta} & \frac{\partial F_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial F_2}{\partial T} & \frac{\partial F_2}{\partial \theta} & \frac{\partial F_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial F_3}{\partial T} & \frac{\partial F_3}{\partial \theta} & \frac{\partial F_3}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (T_1 - T_0) \\ (\phi_1 - \phi_0) \\ (\theta_1 - \theta_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta F_1 \\ -\delta F_2 \\ -\delta F_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde la expresión a la derecha de la ecuación arriba denota la variación de la fuerza y momento con relación a la posición de equilibrio.

Dependiendo del grado de precisión requerido, la posición de equilibrio final podrá ser encontrada en forma iterativa utilizando las ecuaciones anteriores.

Por la combinación del peso y las propiedades hidrostáticas, se producen los momentos de restauración y la estabilidad del buque puede ser determinada. Típicamente los brazos de restauración son graficados para un rango de ángulos de escora donde la escora se asume como inducida por un momento externo en torno del eje X. No obstante, el cálculo es hecho considerando los tres grados de libertad del buque en aguas calmas, de esta forma se garantiza la real condición de equilibrio hidrostático.

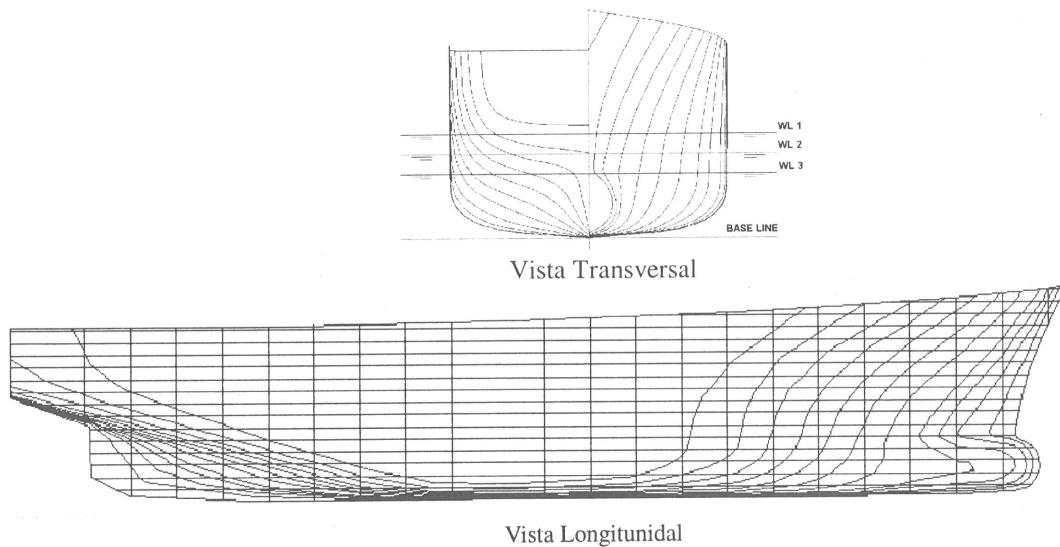


Fig. 4 Formas del buque pesquero de medio porte (Trawler)

RESULTADOS Y DISCUSION

Para ilustrar la influencia del trimado en el cálculo de la estabilidad se ha considerado un buque pesquero de medio porte, de formas tradicionales (Fig. 4). Las características principales del buque son las siguientes:

Eslora en flotación L_w	=	42,5	m
Calado a Proa T_{pr}	=	3,95	m
Calado a Popa T_{pp}	=	3,95	m
Manga Moldeada B_m	=	10,5	m
Desplazamiento	=	1025,7	t
Coefficiente de Bloque C_b	=	0,558	
Coefficiente Prismático C_p	=	0,603	
Area Mojada	=	554,893	m ²

El cálculo de las curvas de brazo de restauración fue realizado considerando primero el trimado fijo, según el método tradicional, y luego, con trimado libre, para tres condiciones de carga determinadas. En todos los casos los valores de brazo de restauración calculados con trimado libre resultaron menores que los calculados con el método tradicional (ver tablas 1 a 6, y figuras 5, 6 y 7).

Las diferencias de los valores máximos de brazo de restauración, calculados con trimado libre con relación al método tradicional, varían de 8,5 a 44,2%, diferencias consideradas grandes, aún para ser utilizados como una aproximación de ingeniería. La situación más crítica examinada corresponde a la condición de carga 3 (condición liviana), en este caso el cálculo con trimado libre indicó una diferencia de más de 40% (44,2%) en el valor del brazo máximo de restauración ($GZ_{m\acute{a}x}$), además de no atender a la mayoría de los criterios de estabilidad recomendados por la IMO - ver tablas 5 y 6, y figura 7. Cabe destacar que en dos de las condiciones de carga, cuando el cálculo es realizado por el método tradicional, el buque cumple con los criterios de la IMO, sin embargo, cuando el cálculo de la curva de brazo de restauración es realizado considerando el trimado libre, el buque no atiende tales criterios.

Las tablas 1 a la 6 muestran los resultados obtenidos en el cálculo de la curva de brazos de restauración GZ, y los compara con los valores requeridos por la OMI para tres condiciones de carga (Buque a Plena Carga, Buque a Media Carga y, Buque en Liviano o

sin Carga), las cuales se evaluaron por el Método Tradicional o del Trimado Fijo (Fixed Trim) y el Método del Trimado Libre (Free Trim). Las figuras 5, 6 y 7, nos muestran las Curvas de Brazos de Adrizamiento GZ obtenidas por los dos métodos antes señalados.

Tabla 1. Condición 1 (Plena Carga) – Trimado fijo

Criterio IMO	Unidades	Valor Requerido	Valor Obtenido	Status
Area entre 0° y 30°	m x grado	3,15	3,807	Pasa
Area entre 0° y 40° ó ϕ_a	m x grado	5,16	7,822	Pasa
Area entre 30° y 40° ó ϕ_a	m x grado	1,719	4,015	Pasa
GZ a 30° ó más	m.	0,2	0,505	Pasa
Angulo de GZ máx.	grado	25	45,205	Pasa
GM	m.	0,35	0,35	Pasa

Tabla 2. Condición 1 (Plena Carga) – Trimado libre

Criterio IMO	Unidades	Valor Requerido	Valor Obtenido	Status
Area entre 0° y 30°	m x grado	3,15	3,071	Falla
Area entre 0° y 40° ó ϕ_a	m x grado	5,16	6,556	Pasa
Area entre 30° y 40° ó ϕ_a	m x grado	1,719	3,485	Pasa
GZ a 30° ó más	m.	0,2	0,462	Pasa
Angulo de GZ máx.	grado	25	45,985	Pasa
GM	m.	0,35	0,350	Pasa

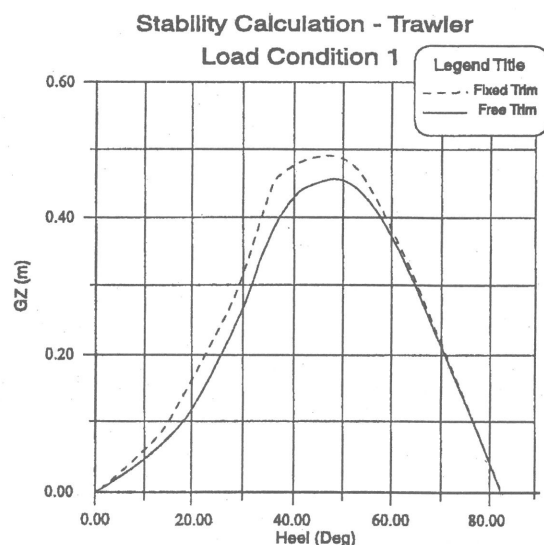


Fig. 5 Condición 1: Plena carga

Tabla 3. Condición 2 (Media Carga) – Trimado fijo

Criterio IMO	Unidades	Valor Requerido	Valor Obtenido	Status
Área entre 0° y 30°	m x grado	3,15	3,876	Pasa
Área entre 0° y 40° ó ϕ_a	m x grado	5,16	7,641	Pasa
Área entre 30° y 40° ó ϕ_a	m x grado	1,719	3,765	Pasa
GZ a 30° ó más	m.	0,2	0,530	Pasa
Angulo de GZ máx.	grado	25	50,907	Pasa
GM	m.	0,35	0,350	Pasa

Tabla 5. Condición 3 (Liviano) – Trimado fijo

Criterio IMO	Unidades	Valor Requerido	Valor Obtenido	Status
Área entre 0° y 30°	m x grado	3,15	3,340	Pasa
Área entre 0° y 40° ó ϕ_a	m x grado	5,16	5,512	Pasa
Área entre 30° y 40° ó ϕ_a	m x grado	1,719	2,172	Pasa
GZ a 30° ó más	m.	0,2	0,348	Pasa
Angulo de GZ máx.	grado	25	57,814	Pasa
GM	m.	0,35	0,400	Pasa

Tabla 4. Condición 2 (Media Carga) – Trimado libre

Criterio IMO	Unidades	Valor Requerido	Valor Obtenido	Status
Área entre 0° y 30°	m x grado	3,15	3,331	Pasa
Área entre 0° y 40° ó ϕ_a	m x grado	5,16	6,431	Pasa
Área entre 30° y 40° ó ϕ_a	m x grado	1,719	3,099	Pasa
GZ a 30° ó más	m.	0,2	0,447	Pasa
Angulo de GZ máx.	grado	25	50,702	Pasa
GM	m.	0,35	0,350	Pasa

Tabla 6. Condición 3 (Liviano) – Trimado libre

Criterio IMO	Unidades	Valor Requerido	Valor Obtenido	Status
Área entre 0° y 30°	m x grado	3,15	3,378	Pasa
Área entre 0° y 40° ó ϕ_a	m x grado	5,16	5,039	Falla
Área entre 30° y 40° ó ϕ_a	m x grado	1,719	1,661	Falla
GZ a 30° ó más	m.	0,2	0,194	Falla
Angulo de GZ máx.	grado	25	57,011	Pasa
GM	m.	0,35	0,400	Pasa

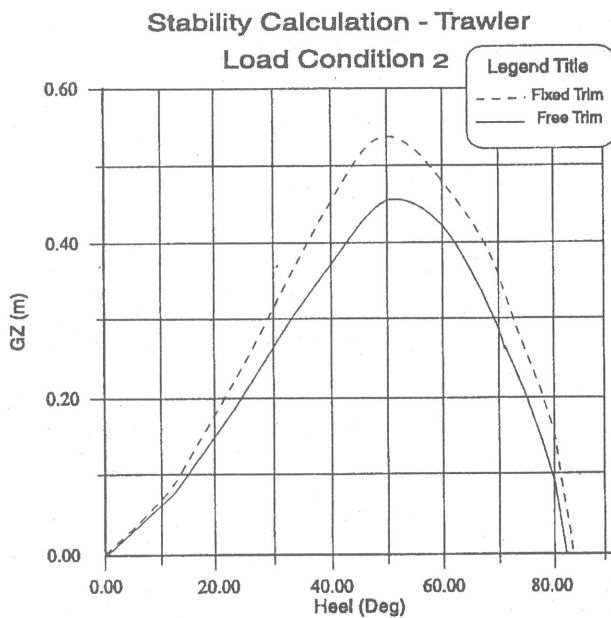


Fig. 6 Condición 2: Media carga

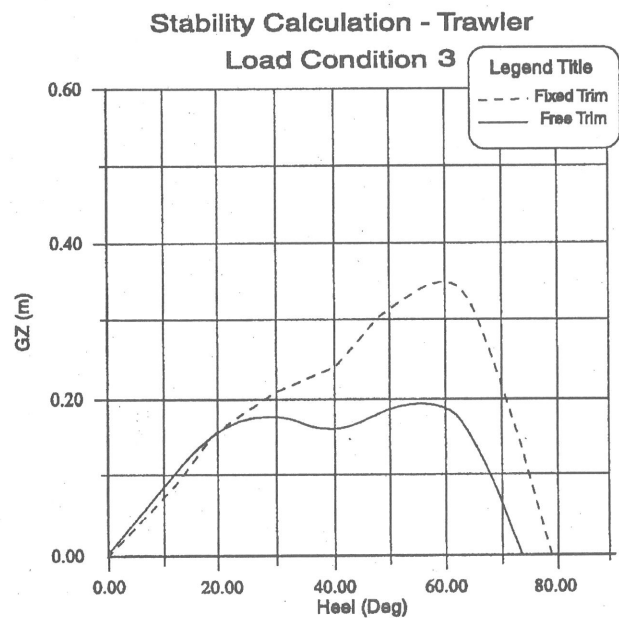


Fig. 7 Condición 3: Liviano

CONCLUSIONES

Como resultado de la diferencia de las formas del buque entre proa y popa, las condiciones de cálculo para las curvas de restauración por el método convencional, no son estrictamente válidas para buques con formas diferentes en proa y popa.

En el caso de buques mercantes las diferencias entre las formas no son muy grandes, de modo que el cálculo se aproxima suficientemente y las pequeñas diferencias habilitan su uso en Ingeniería Naval. Para el caso de los buques pesqueros, en especial para embarcaciones de medio y pequeño porte, la situación se torna más crítica. La marcada diferencia entre los cuerpos de proa y popa que caracteriza las embarcaciones pesqueras, puede introducir errores significativos en el cálculo de las características de restauración.

La marcada diferencia entre los cuerpos de proa y popa que caracteriza las embarcaciones pesqueras, lanza serias dudas sobre la aplicación del método convencional al cálculo de las características de estabilidad, esto unido al hecho de que generalmente este tipo de buques navega en condiciones críticas, y en operaciones de pesca extremadamente riesgosas, como es el caso particular de los buques de pesca al cerco, tan difundidos en nuestro litoral.

Debe notarse que el buque utilizado para ilustrar la aplicabilidad del método tradicional (utilizando las

curvas cruzadas de estabilidad), posee un francobordo bastante satisfactorio, y las formas del buque son bastante convencionales. Podemos con certeza indicar entonces que para embarcaciones menores, en las cuales las formas de proa y popa difieren en forma más significativa, este problema podrá aparecer en forma más acentuada, pudiéndose encontrar diferencias aún mayores en el cálculo de la estabilidad.

Además, el bajo francobordo con que normalmente operan los buques de pesca, y las diferentes condiciones de trimado estático en las diferentes condiciones de operación, demandan un análisis más detallado de las características de estabilidad.

REFERENCIAS

1. International Maritime Organization, "Code On Intact Stability For All Types Of Ships Covered By IMO Instruments". Resolution A.749 (18), pp. 264-271, 274-276 (1993).
2. K. J. Rawson, E. C. Tupper, "Basic Ship Theory", Longman Group Limited, London (1968).
3. B. R. Clayton & R. E. D., "Mechanics Of Marine Vehicles", Bishop J. W. Arrowsmith Ltd., Bristol (1989).
4. B. García, D. Rodríguez, "Teoría Del Buque", Cádiz (1974).
5. C. Godino Gil, "Teoría Del Buque Y Sus Aplicaciones", Madrid (1956).
6. A. Mandelli, "Elementos De Arquitectura Naval", Librería y Editorial Alsina, Buenos Aires (1960).

