

Ministerio de Marina
CANAL DE EXPERIENCIAS HIDRODINAMICAS, EL PARDO

La estabilidad transversal en el proyecto de buques

POR
PASCUAL O'DOGHERTY SANCHEZ
Capitán de Fragata. Ingeniero Naval de la Armada



MADRID
ENERO 1966

LA ESTABILIDAD TRANSVERSAL
EN EL PROYECTO DE BUQUES

LA ESTABILIDAD TRANSVERSAL EN EL PROYECTO DE BUQUES

Por Pascual O'DOGHERTY SANCHEZ

Capitán de Fragata. Ingeniero Naval de la Armada.

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto el estudio de la estabilidad transversal y su importancia en el proyecto de los buques. Para ello se tienen en cuenta los diversos factores que afectan a la estabilidad, analizando brevemente los distintos criterios de estabilidad puestos en vigor por diferentes países, así como las condiciones de estabilidad de numerosos buques de diferentes tipos, entre los que se incluyen muchos buques que han zozobrado.

El trabajo estará dividido en tres partes. En la parte I, se estudia el efecto de las olas en la estabilidad. La parte II tratará de otros efectos importantes en el estudio de la estabilidad. Del análisis efectuado se ha deducido un criterio de estabilidad, para la valoración de la estabilidad de un nuevo proyecto, el cual será expuesto en la parte III.

PARTE I

EFEECTO DE LAS OLAS EN LA ESTABILIDAD

INDICE

1. NOTACIÓN EMPLEADA.
2. INTRODUCCIÓN.
3. EFECTOS DE LAS OLAS EN LA ESTABILIDAD.
 - 3.1. Generalidades sobre las olas.
 - 3.2. Movimientos de balance.
 - 3.3. Brazo escorante producido por las olas de través.
 - 3.4. Modificación de los valores de los brazos adrizantes, por efecto de las olas.

4. LISTA DE REFERENCIAS.

1. NOTACIÓN EMPLEADA:

- α = Coeficiente adimensional = $\frac{BM}{2 \cdot GM}$
- B = Manga de trazado, metros.
 B = Centro de carena del buque.
 BG = Distancia vertical entre el centro de carena y el centro de gravedad del buque, metros.
 BM = Radio metacéntrico transversal, metros.
 C_B = Coeficiente de bloque (calculado con la eslora entre perpendiculares).
- C_K = Coeficiente adimensional de Kempf = $T \sqrt{\frac{g}{B}}$
- D = Puntal de trazado, metros.
 F = Fuerza, toneladas métricas.
 f = Coeficiente numérico que interviene en la expresión del periodo de balance.
 G = Centro de gravedad del buque.
 g = Aceleración de la gravedad = 9,81 metros. seg⁻².
 GM = Altura metacéntrica transversal corregida por superficies libres, metros.

- GZ = Brazos de palanca del par de estabilidad transversal, metros.
 H = Calado medio del buque, metros.
 h = Altura de las olas, metros.
 h = Brazo de estabilidad dinámica, hasta el ángulo θ , metros.
 K = Radio de inercia del buque, para oscilaciones transversales, metros.
 L = Eslora entre perpendiculares, metros.
 M = Momento de una fuerza, tonelámetros.
 P = Presión, toneladas. metros⁻².
 Q = Relación manga/puntal.
 R = Radio de la trayectoria orbital de las partículas de agua, metros.
 T = Periodo de balance del buque, para la oscilación doble o completa, segundos.
 T_o = Periodo de las olas, segundos.
 T = Periodo de balance del buque, cuando el ángulo de balance es θ , segundos.
 T_i = Periodo de balance del buque, para pequeñas oscilaciones, teniendo en cuenta las resistencias pasivas, segundos.
 T_m = Valor medio observado del periodo de las olas, segundos.
 V_o = Velocidad de traslación de las olas, metros seg⁻¹.
 V_s = Velocidad orbital de las partículas de agua, según el eje OX, metros seg⁻¹.
 V_r = Velocidad orbital de las partículas de agua, en el seno de las olas, metros seg⁻¹.
 δh_{din} = Disminución del brazo de estabilidad dinámica, Para el ángulo de inclinación de 40 grados, producida por olas longitudinales, metros.
 λ = Longitud de las olas, cresta a cresta, metros.
 λ_m = Valor medio observado de la longitud de las olas, metros.
 θ = Angulos de inclinación.
 ρg = Peso específico del agua de mar = 1,026 toneladas, metro⁻³.
 ω = Velocidad angular orbital de las partículas de agua en una trocoidal, radianes por segundo.
 Δ = Desplazamiento del buque, toneladas métricas.

2. INTRODUCCIÓN:

La Estabilidad transversal de los buques debe ser estudiada con la máxima atención por afectar a la seguridad de los buques en la mar, a su capacidad de carga, condiciones marineras y al bienestar de los pasajeros y dotación. La necesidad de fijar unos criterios de estabilidad adecuados para los distintos tipos de buques se hace sentir en la actualidad en los diversos países marítimos, pues ello llevaría a evitar, o al menos aminorar, el gran número de accidentes que tienen lugar, con cuantiosas pérdidas materiales y de vidas humanas.

El problema de fijar unas características mínimas de estabilidad, que aseguren unas condiciones satisfactorias de utilización de los buques, es particularmente complejo por depender de numerosas variables, lo que ha hecho que los diversos criterios establecidos hasta ahora no hayan sido considerados en general como satisfactorios, comprobándose después en la práctica la falta de garantía de dichos criterios, al zozobrar buques cuya estabilidad cumplía con los requerimientos de los criterios de estabilidad más conocidos.

La evaluación de la estabilidad transversal de cualquier buque ha de hacerse sin olvidar otros factores igualmente importantes, tales como la Propulsión y Resistencia estructural, debiendo ser el objetivo del proyectista la obtención de un cierto compromiso que satisfaga las exigencias básicas del proyecto, dentro de unas óptimas condiciones económicas de utilización.

La fijación de criterios definidos de estabilidad para todos los tipos de buques es tarea de grandes dificultades, ya que han de tenerse en cuenta las grandes diferencias que pueden existir en sus características, condiciones de servicio y margen de estabilidad que se considera necesario. Las mismas ideas, no obstante, podrían aplicarse a la Resistencia estructural, problema en el cual las distintas Sociedades Clasificadoras han definido de forma clara los escantillones que se consideran necesarios para muchos tipos de buques distintos.

Al comparar la actitud del proyectista, con relación a la Estabilidad y Resistencia estructural, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

a) La proporción de pérdidas de buques atribuidas a falta de resistencia estructural es muy inferior a la imputable a deficiencias de estabilidad.

b) Las pérdidas de buques debidas a deficiente resistencia estructural suelen ocurrir en buques grandes, sin que pueda ponerse en duda la causa del accidente, dando lugar a grandes estudios para procurar evitar en lo sucesivo dichas pérdidas.

c) La obtención de una resistencia estructural adecuada está asegurada por las reglas de las Sociedades Clasificadoras.

d) Los buques perdidos por posible deficiencia de estabilidad son muchas veces pequeños, siendo la falta de estabilidad una de las causas del accidente, ade-

más de otras concausas tales como corrimiento de carga, mala estiba, mal tiempo, defectuosa estanqueidad, metida del timón a alta velocidad, etc., sin que se pueda garantizar cuál fue la causa primaria del accidente. Solamente el hundimiento de buques de cierta importancia, como el trasatlántico "Andréa Doria" o el transportador japonés "Toya Maru" (1), donde se perdieron 1.172 vidas, promueven investigaciones detalladas, que pueden conducir a veces a la fijación de criterios de estabilidad apropiados.

e) No existe ninguna regla de uso general que garantice la estabilidad de los buques, ya que sólo la determinación del mínimo francobordo reglamentario puede tener una relación indirecta con la estabilidad.

Si se comparan las características de estabilidad y propulsión es evidente el mucho mayor interés dedicado a todos los problemas relacionados con la propulsión, ya que los numerosos Canales de experiencias existentes han investigado de forma sistemática todos los factores que puedan contribuir a la obtención de óptimas condiciones propulsivas, siendo práctica normal en cualquier proyecto de cierta importancia efectuar un estudio detenido de las formas de la carena con objeto de conseguir las mejores condiciones propulsivas posibles.

Parece desprenderse de todo ello que se dedica en general mucha mayor atención a la propulsión y a la resistencia estructural que a la estabilidad. Puede estimarse que la tendencia actual en el proyecto de buques mercantes es la siguiente:

1) Las dimensiones del proyecto deben asegurar una condiciones propulsivas óptimas, para el peso muerto y autonomía especificados.

2) El buque ha de tener los escantillones correspondientes a esas dimensiones, de acuerdo con las reglas de la Sociedad Clasificadora.

3) La estabilidad del buque ha de satisfacer ciertos valores mínimos, fijados según la experiencia del proyectista o los deseos del armador.

Durante mucho tiempo ha sido una práctica usual el considerar la estabilidad inicial de un buque como único parámetro al juzgar sus condiciones de estabilidad. Esta práctica puede ser satisfactoria cuando el proyecto es muy semejante a un buque base con amplia estabilidad, siendo el valor de GM del proyecto igual o superior al GM del buque base. En cambio, si el proyecto difiere apreciablemente del buque en la forma de sus secciones, número y tamaño de sus superestructuras estancas, francobordo, forma de sus líneas de agua, etc., el valor de GM puede conducir a grandes errores en la evaluación de la estabilidad del buque.

Actualmente está ya generalmente establecido que todos los buques oceánicos deben ser provistos de curvas de estabilidad para las principales condiciones de carga por que ha de pasar el buque, obtenidas a partir de los resultados de la experiencia de estabilidad reglamentaria. El estudio de las curvas de estabilidad

estática del buque, en sus diversas condiciones de carga, constituye la base de los modernos criterios de estabilidad.

Teniendo en cuenta la naturaleza empírica del actual estado de conocimientos en lo que respecta a los principales elementos meteorológicos que condicionan la seguridad y estabilidad del buque, esto es, la mar y el viento, puede decirse que la mejor forma de establecer unos criterios razonables de estabilidad ha de basarse en el análisis de las condiciones de estabilidad de buques cuyo comportamiento en la mar es conocido. De esta forma J. Rahola (2), después de analizar las curvas de estabilidad de numerosos buques hundidos, propuso su conocido criterio de estabilidad en 1939.

El análisis de algunos datos publicados por C. V. Manley (3) sobre buques perdidos, permite hacer las siguientes consideraciones:

a) El total de pérdidas, como porcentaje del tonelaje total de buques, muestra una tendencia decreciente.

b) Desde 1924, el 80 por 100 de los buques abandonados, zozobrados o desaparecidos eran buques de esloras inferiores a 300 pies.

c) Del estudio de las dimensiones de los buques zozobrados se deduce que el 90 por 100 eran de esloras inferiores a 300 pies. De esos buques sólo uno se encontraba en lastre en el momento del accidente, estando todos los demás en plena carga, esto es, en la peor condición de estabilidad, y 42 por 100 de ellos transportaban carbón, mineral o cualquier otra carga a granel. Es de notar que los buques que transportan carbón tienen francobordos muy reducidos y también una máxima proporción de buques zozobrados.

d) Los buques de esloras inferiores a 300 pies, señalados como abandonados, desaparecidos o zozobrados en el período 1919-1955 pueden clasificarse de la forma siguiente:

Tipo de buque	Número de buques perdidos	Tanto por 100
De una cubierta, con menos del 50 por 100 de superestructuras	480	61,0
De una cubierta, con más del 50 por 100 de superestructuras	30	3,8
De cubierta de saltillo	196	24,8
Buques de cubierta ligera	24	3,0
Buques de cubierta de abrigo	19	2,5
Buques con dos o más cubiertas	39	4,9

Se puede observar que la mayor proporción de las pérdidas corresponde a buques con menos superestructuras y por tanto con menor francobordo efectivo. Sólo una pequeña proporción de pérdidas corresponden a buques con cubierta de abrigo o con más del 50 por 100 de superestructuras.

Analizando los porcentajes del tonelaje mundial

perdidos el decenio 1948-1957 se obtuvo la fig. 1. Para ello las pérdidas se dividieron en dos grupos:

Grupo I: Buques embarrancados o incendiados.

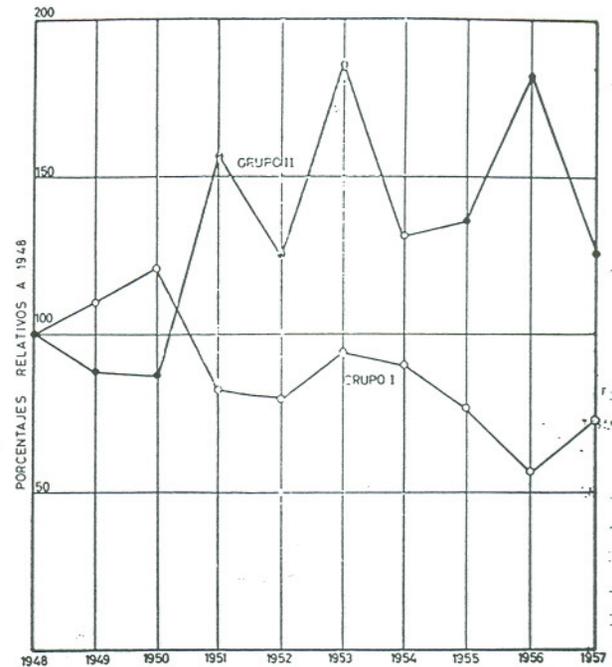


Fig. 1.—Análisis de los buques perdidos durante el intervalo 1948-1957.

Grupo II: Buques perdidos por colisión y buques abandonados, zozobrados o desaparecidos.

Puede admitirse que las pérdidas del Grupo I no tienen relación alguna con la estabilidad en la mayoría de los casos, mientras que las pertenecientes al grupo II pueden tener como causa primaria o secundaria en muchos casos la deficiencia de estabilidad.

La fig. 1 da las pérdidas para cada grupo y año como porcentaje de la pérdida correspondiente del año 1948. Estos porcentajes fueron calculados como sigue:

Porcentaje de pérdidas =

$$100 \times \frac{\text{Porcentaje del tonelaje mundial perdido en cada año}}{\text{Porcentaje del tonelaje mundial perdido en 1948}}$$

Del análisis de la fig. 1 se deduce que, si bien los porcentajes de pérdidas comprendidas en el Grupo I han decrecido considerablemente en el período 1948-1957, las pérdidas incluidas en el Grupo II, que pueden atribuirse a deficiencia de estabilidad en muchos casos, han tendido a aumentar en el mismo período.

Debe tenerse en cuenta que la falta de la adecuada estabilidad puede ser la causa primaria o secundaria de la pérdida de muchos buques, atribuida a otras razones, tales como el corrimiento de la carga, mal tiempo o entrada de agua a bordo, ya que esas incidencias han de ser previstas en el proyecto, sin que haya de depender la seguridad del buque de una óptima eficacia marinera del Capitán y dotación.

Wendel (4) hace notar que el número de buques pequeños zozobrados, abandonados y desaparecidos aumenta de una forma progresiva, siendo el 36 por 100 de los buques perdidos en el período 1899-1913 menores de 200 pies de eslora. En el período 1919-1936 ese porcentaje era el 48 por 100, siendo el 66 por 100 del total de pérdidas en el intervalo 1943-1955. Debe destacarse que ello ocurre a pesar del aumento progresivo del tamaño de los buques durante todo ese tiempo. Wendel observó también que más del 70 por 100 de los buques perdidos lo fueron en invierno, por lo que la mar y el viento juegan en ello un papel importante. La proporción de buques nuevos perdidos era del mismo orden que la de buques viejos, siendo la gran mayoría de los buques perdidos, buques de una sola cubierta o buques transportando cargas a granel.

Estas conclusiones hacen resaltar la necesidad urgente de definir unos criterios adecuados de estabilidad, lo cual es aún más imprescindible para buques pequeños. Esto ha sido ya señalado por otros muchos autores como Skinner (5) y se hace notar en la tendencia moderna en el proyecto de pesqueros de altura al asignarles un francobordo que excede ampliamente al mínimo especificado por las Sociedades Clasificadoras (6). Ya, durante la Segunda Guerra Mundial, el Almirantazgo Británico tuvo como criterio fijar valores mínimos de francobordo, para los pesqueros que eran adaptados para el servicio naval, que eran superiores a los requeridos por la práctica usual (7).

Se han hecho muchas propuestas para fijar criterios de estabilidad, pudiendo citarse entre otros los de Burrill (8), Holt (9), Pierrottet (10), Rahola (2), Nickum (11), Burgess (12), Wendel (4) y Takagi (13), así como los criterios japoneses (14), ruso (15), del Bureau of Ships (16), criterio de la Marina de Guerra española (17), criterios alemán oriental y polaco (18) y criterios holandés para costeros, francés y yugoslavo (19). La cronología de todas estas propuestas hace ver que la preocupación por la estabilidad ha ido pasando gradualmente de investigadores aislados a tomar carácter nacional recientemente. En la actualidad existe una agencia internacional, el I. M. C. O. (Organización Consultiva Internacional Marítima), en la cual los diversos países estudian en forma conjunta la posible adopción de criterios internacionales de estabilidad para diversos tipos de buques.

El autor cree, después de haber analizado varios centenares de curvas de estabilidad de buques de muchos tipos y tamaños, que la mayor parte de los buques perdidos por deficiencias de estabilidad son el resultado de no prestar suficiente atención a esta importante característica durante el proyecto del buque. Es por ello necesario tener en cuenta la estabilidad en las fases preliminares del proyecto para evitar graves dificultades posteriores que siempre perjudican las condiciones normales de utilización

del buque. A veces las líneas elegidas para el proyecto hacen muy difícil la obtención de unas características razonables de estabilidad. En muchos casos, un buque, cuyas formas han sido proyectadas con el máximo cuidado desde el punto de vista de la propulsión, se ve obligado por su escasa estabilidad a transportar siempre una carga inútil de lastre permanente, con una pérdida equivalente de carga útil que sobrepasa con mucho la pequeña ganancia obtenida en su consumo de combustible. En otros casos las dimensiones impuestas por el armador, para obtener una mayor capacidad de carga, conducen a una estabilidad defectuosa que obliga a lastrar el buque, lo que, a su vez, hace imposible utilizar esa mayor capacidad de carga buscada. Una estabilidad deficiente puede también ser muy costosa al armador al obligar a restringir el empleo del buque en caso de mal tiempo, causando a veces dificultades en la utilización del buque. Una estabilidad escasa puede obligar a lastrar con agua salada los tanques vacíos de combustible, lo que puede ser origen de inconvenientes en el normal funcionamiento de la planta propulsora y mayores gastos de entretenimiento. En el caso de buques de pasaje una estabilidad insuficiente puede producir mal comportamiento marineramente del buque y mala reputación entre los pasajeros, con la consiguiente repercusión económica.

La estabilidad es también de importancia capital en el proyecto de buques de guerra. En buques de guerra de proyecto moderno es difícil conseguir la estabilidad necesaria en la condición de rosca, por la adición de pesos altos de los modernos equipos electrónicos y armas de todo tipo, combinado con el ahorro de peso conseguido en los modernos equipos propulsores. El efecto conjunto es una subida sustancial en el centro de gravedad del buque en rosca, lo cual requiere una gran atención al problema de estabilidad desde los primeros pasos del proyecto. En estos buques la necesidad de una estabilidad aceptable en caso de averías obliga a veces a emplear valores de *GM* superiores a lo que la consideración de los movimientos de balance pudiera aconsejar. En estos casos el empleo de estabilizadores de balance, bien sean de tipo activo o pasivo, puede conducir a resultados satisfactorios.

Al determinar los valores de *GM* y de la estabilidad dinámica que se consideran aceptables para un cierto buque, es necesario tener en cuenta las condiciones de servicio del mismo, que fijarán la situación operativa de mínima estabilidad. Deben también tenerse en cuenta los efectos de las diferentes causas perturbadoras, bien sean debidas a la acción de agentes externos o sean inherentes al propio buque. La estabilidad transversal del buque ha de ser capaz de soportar esas acciones perturbadoras, entre las cuales merecen citarse las siguientes:

a) La acción de las olas: Esta acción es, con mucho, la más importante de las que pueden poner en

peligro la seguridad del buque. Sus efectos son desfavorables en un doble aspecto:

1) Con mar de través el buque será sometido a la acción dinámica de las olas, que alterando su posición de equilibrio, le obligan a efectuar movimientos de balance, que pueden llegar a ser peligrosos en el caso de sincronismo.

2) Con mar de popa, la estabilidad transversal del buque, calculada para inclinaciones en aguas tranquilas, puede quedar muy sustancialmente disminuída cuando el buque está en la situación de quebranto, sobre una ola de longitud igual a la eslora. Esta reducción de estabilidad puede llegar a ser peligrosa cuando existe sincronismo entre el buque y las olas, o sea, cuando la velocidad del buque sea igual o muy próxima a la velocidad de propagación de las olas.

La condición más desfavorable en que pueden encontrarse los buques es con mar de aleta, ya que en dicha situación pueden llegar a coincidir ambos efectos desfavorables. Es, por otra parte, un hecho conocido que numerosos barcos pequeños se pierden con mal tiempo y mar de aleta, cuando están corriendo el temporal. Numerosos autores han hecho notar este peligro, entre ellos Mockel (20), quien indica que los buques pequeños a velocidades elevadas, con mar de popa, se encuentran en una situación de gran peligro cuando su velocidad es próxima a la velocidad de las olas.

b) La acción del viento: La acción escorante del viento, ejerciendo su presión sobre la obra muerta del buque, puede llegar a ser considerable, sobre todo en buques de muchas superestructuras, tales como buques de pasaje, cruceros, etc. Este efecto escorante del viento puede llegar a hacer peligrar la seguridad del buque cuando éste efectúa grandes movimientos de balance impulsado por las olas.

c) Efecto escorante de las evoluciones a altas velocidades, que es especialmente importante para buques rápidos, tales como destructores y lanchas rápidas.

d) Movimiento súbito del pasaje sobre cubierta, hacia una de las bandas del buque.

e) Corrimiento de la carga, que puede dar lugar a una escora permanente que ponga en peligro la seguridad del buque.

Este efecto se presenta con mayor frecuencia en buques que transportan cargas a granel o cubiertas de madera.

f) Pérdida de estabilidad producida por la inundación de algún compartimiento. Este problema ha sido estudiado por numerosos autores, entre ellos Niedermair (21).

g) Pérdidas de estabilidad por efecto de carenas líquidas.

h) Formación de hielo en las superestructuras y arboladura. Ello puede originar una reducción apreciable en la estabilidad, como fue comprobado en Gran Bretaña, al investigar experimentalmente las causas

del hundimiento del pesquero de altura Roderigo y otros (22) (23). El criterio ruso de estabilidad tiene en cuenta este efecto, considerando que el hielo acumulado sobre las cubiertas expuestas a la intemperie pesa 30 kilos por metro cuadrado. Igualmente se supone que el peso de hielo por metro cuadrado de la superficie lateral proyectada de la obra muerta del buque, es 15 kilogramos.

Todos los factores citados han de ser tenidos en cuenta en el proyecto de buques, asignándole a cada uno de ellos la importancia que le corresponde. La pérdida de estabilidad por carenas líquidas puede ser conocida de antemano y controlada en el proyecto dentro de los límites deseables. En el trabajo de la referencia (24) se dan normas prácticas para el cálculo de la pérdida de estabilidad producida por las carenas líquidas. De hecho, las curvas de estabilidad que se consideran al juzgar las condiciones de estabilidad de un buque, son siempre corregidas, previamente, descontando a los brazos adrizantes del buque los brazos escorantes debidos al movimiento libre de los líquidos contenidos a bordo.

El efecto desfavorable de la inundación de algún compartimiento es tenido en cuenta en los buques de guerra en el estudio separado de sus condiciones de estabilidad después de averías. En los buques mercantes este estudio es realizado de una forma indirecta al calcular la subdivisión estanca del buque. En todo caso la integridad estanca del buque ha de ser garantizada dotando de medios eficaces de cierre a todas las aberturas en las cubiertas expuestas a la intemperie. También es necesario prevenir la acumulación de agua en cubierta, dotando para ello al buque de imbornales y portas de desagüe de tamaño apropiado.

El posible corrimiento de la carga puede tener consecuencias muy graves en ciertos buques, tales como los mineraleros, transportes de grano y buques con cubiertas de madera. En estos buques es esencial una adecuada estiba de la carga. Los modernos mineraleros llevan sus bodegas compartimentadas por medio de mamparos longitudinales, con lo cual se minimizan los posibles efectos adversos de un corrimiento del mineral. En los buques dedicados al transporte de cargas a granel deberán instalarse arcadas limitadoras del corrimiento de la carga, así como alimentadores de grano en cada una de las bodegas. Es igualmente conveniente para la buena estiba de la carga colocar grano ensacado en la parte superior de las bodegas. En España los buques que transporten grano han de satisfacer las prescripciones establecidas por la Dirección General de Buques de la Subsecretaría de la Marina Mercante (25).

Las condiciones especiales de servicio de cada buque, de las que dependen la magnitud de cada una de las acciones escorantes enumeradas anteriormente, y la mayor o menor probabilidad de acción simultánea de varias de ellas, han de ser muy tenidas en cuenta al fijar el margen de seguridad que se considera aconsejable en cada caso.

A continuación se procede a estudiar someramente los distintos efectos escorantes que han de ser tenidos en cuenta al juzgar las condiciones de estabilidad del buque intacto.

3. EFECTOS DE LAS OLAS EN LA ESTABILIDAD:

3.1. Generalidades sobre las olas.

En aguas suficientemente profundas, cuya profundidad exceda a la mitad de la longitud de las olas, se ha comprobado que las olas regulares tienen unas características análogas a las de las olas trocoidales. La velocidad de traslación de la ondulación viene dada por la fórmula:

$$V_o = \sqrt{\frac{g \lambda}{2 \pi}} \quad [3.1]$$

La relación entre la longitud de las olas y su período, T_o , es:

$$\lambda = \frac{g \cdot T_o^2}{2 \pi} \quad [3.2]$$

Las partículas de agua en movimiento tienen unas velocidades distintas, dependientes de las órbitas que describen. La velocidad en la cresta o en el seno de la trocoide superficial es:

$$V_s = \omega \cdot R = \frac{2 \pi}{T_o} \cdot \frac{h}{2} = \sqrt{\frac{g \pi}{2 \lambda}} \cdot h \quad [3.3]$$

En la realidad es más frecuente encontrar sistemas irregulares de olas, formados por olas de diferentes longitudes distribuidas según su espectro característico. Las relaciones anteriores son también válidas para elementos individuales de un sistema irregular de olas.

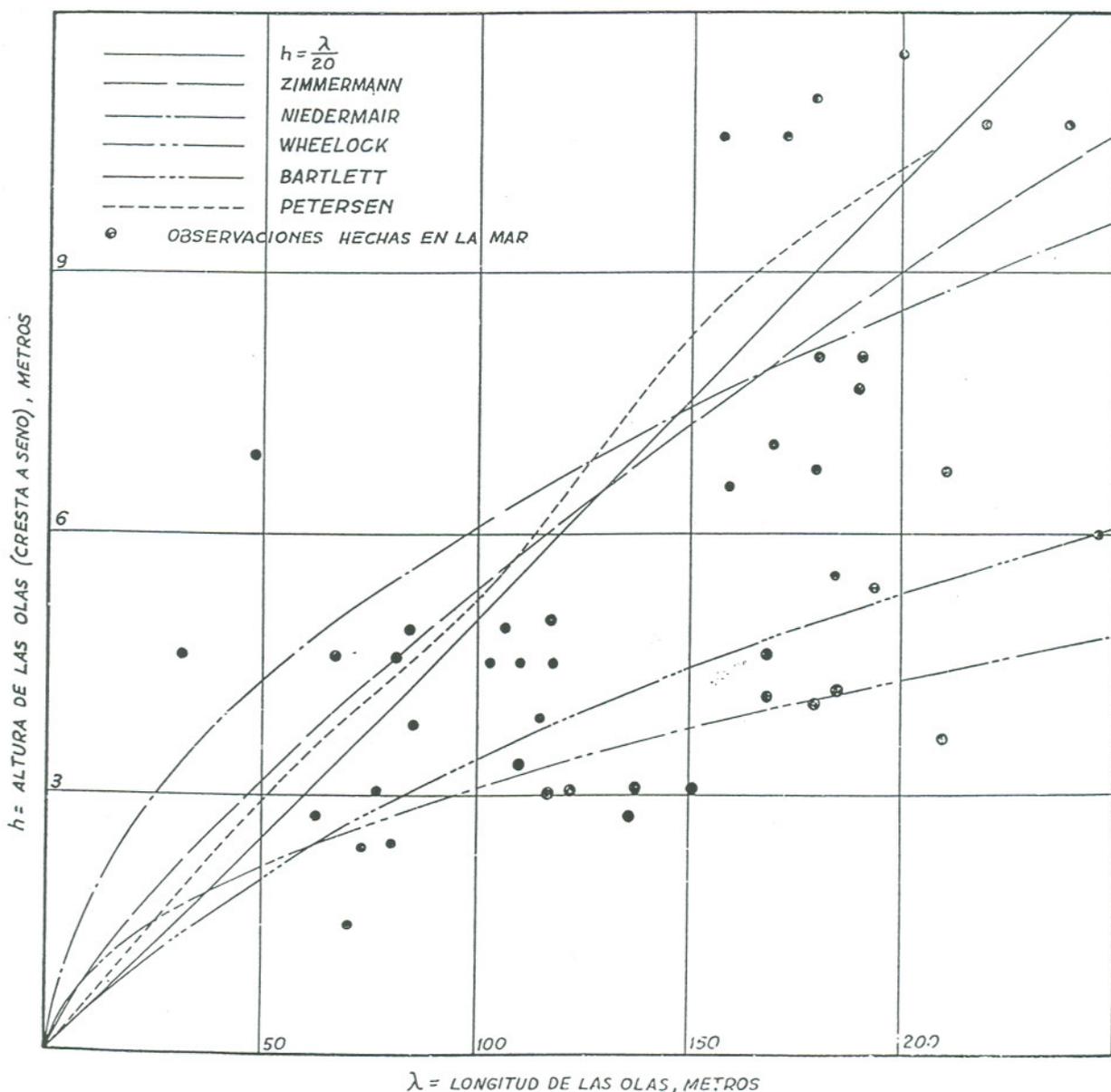


Fig. 2.—Información sobre altura de las olas, en función de la longitud de las mismas

Cuando se observa un sistema irregular de olas, considerando los valores medios observados de la longitud y período, λ_m y T_m , se verifica:

$$\lambda_m = \frac{k g \cdot T_m^2}{2 \pi} \quad [3.4]$$

donde k es un coeficiente experimental cuyo valor depende del espectro de las olas (25). El valor de k es tanto más próximo a la unidad cuanto más estrecho es el espectro de las olas y más regulares son las mismas. En las observaciones de dos buques meteorológicos ingleses, el S. S. Cairndhu y el R. V. Ernest Holt, se comprobó que las observaciones del buque Cairndhu, situado en mar abierta en el océano, daban valores de k cercanos a la unidad, mientras las observaciones del Ernest Holt, situado en aguas más restringidas, daban lugar a valores de k cuyo valor medio era 0,5 (26).

La relación entre la altura h de las olas, su longitud y su período, en un determinado momento y en una zona fijada, es imposible de expresar por una fórmula matemática de una manera precisa, ya que depende de numerosas variables entre las que se pueden mencionar:

- a) Longitud de las olas.
- b) Fuerza del viento y tiempo que lleva establecido dicho viento.
- c) Profundidad del mar y configuración geográfica de la zona considerada.
- d) Existencia de corrientes marinas que modifiquen la forma de las olas.

Diversos autores han estudiado las características de las olas oceánicas, dando fórmulas empíricas para expresarlas. Cornish (28) fue uno de los primeros en hacer un estudio documentado, siguiéndole modernamente entre otros los estudios de Sverdrup y Munk (29) y los de Pierson, Neumann y James (30).

Para cálculos de resistencia longitudinal se vienen empleando en muchos países olas de altura $h = \lambda/20$, las cuales suelen dar valores inferiores a los máximos reales para olas de pequeña longitud. En Norteamérica se utilizan las alturas dadas por Niedermair $h = 1,10 \sqrt{\lambda}$, donde λ y h están expresados en pies, las cuales están más de acuerdo con los valores extremos reales. También pueden citarse las olas de Petersen (31) y las de Zimmermann (32), cuyos valores concuerdan bastante bien con los datos reales de alturas máximas.

Para representar los valores medios de las alturas de las olas, interesantes para el estudio de los movimientos del buque en la mar, pueden emplearse las olas definidas por Wheelock, de altura $h = 0,55 \sqrt{\lambda}$ (datos en pies), o las olas dadas por el diagrama de Bartlett (33).

En la fig. 2 se han representado todos estos diagramas, en unión de datos reales obtenidos en la mar por diferentes observadores, entre los que se

encuentra Kent (34), Burrill (8), Schnadel (35) y de Santis (36).

Es interesante citar aquí la escala de mar establecida por Petersen, indicativa del estado del mar, en función de la longitud de las olas predominantes. Los valores de la escala de Petersen y las longitudes de olas asociadas con ellos son los siguientes:

Escala de Petersen	Valores de λ m.
1	menor que 11
2	11-18
3	18-26
4	26-45
5	45-80
6	80-125
7	125-160
8	160-188
9	mayor que 188

3.2. Movimientos de balance.

Todo cuerpo situado en un medio homogéneo y sometido a acciones periódicas, tiende a oscilar girando alrededor de un eje que pasa por su centro de gravedad, G . En un buque de superficie, que está parcialmente en el agua y parcialmente en el aire, su eje de oscilación es esencialmente variable, no pasando exactamente por el centro de gravedad. Experimentalmente se ha observado que el eje de oscilación para movimientos de balance, está generalmente situado entre G y la flotación, Vedeler (37) considera que puede tomarse como eje de oscilación al eje longitudinal que pasa por G , lo cual fue deducido en experiencias llevadas a cabo por Bertin y Suyehiro. Por otra parte, en buques normales, G está próximo a la flotación por lo que puede admitirse sin errores sensibles que el eje longitudinal de oscilación del buque, para movimientos de balance, pasa por G .

El período de balance de un buque, para pequeñas oscilaciones en aguas tranquilas, viene dado por la fórmula:

$$T = \frac{2 \pi \cdot K}{\sqrt{g \cdot GM}} \quad [3.5]$$

donde K = radio de inercia del buque, para oscilaciones transversales.

Operando en el sistema métrico, resulta:

$$T = \frac{2,006 \cdot K}{\sqrt{GM}} \quad [3.6]$$

En la práctica es usual expresar el radio de inercia K en función de la manga, por lo que [3.6] puede expresarse:

$$T = \frac{f \cdot B}{\sqrt{GM}} \quad [3.7]$$

donde f es un coeficiente numérico que depende del tipo de buque, de su estado de carga y de su disposición general. Los valores de f pueden determinarse experimentalmente, midiendo el período de balance y conociendo el valor de GM correspondiente.

A continuación se incluyen algunos valores de f para buques de guerra, mercantes y pesqueros, los cuales pueden servir como orientación para estimar los valores correspondientes a buques similares.

TABLA I
Valores de f para buques de guerra

BUQUES	Estados de carga			Referencia
	Rosca	Plena carga	Indefinido	
Buques de guerra			0,71 a 0,75	(38)
Acorazado			0,75	(32)
Destructor		0,717		(39)
Patrulleros			0,76	(40)
Destruyores			0,75	(40)
Destructor		0,86		(41)
Destructor		0,82		(41)
Destructor A/S	0,77	0,78		(42)
Fragata	0,83	0,79		(42)
Fragata rápida	0,825	0,785		(42)
Crucero	0,783			(42)
Guardapescas	0,78			(42)

TABLA II
Valores de f para buques mercantes

BUQUES	Estados de carga				Referencia
	Rosca	En lastro	Plena carga	Indefinido	
Pequeños buques de pasaje				0,77	(40)
Buques de mucho puntal				0,83	(40)
Costeros		0,780	0,760		(43)
Costero con cubertada		0,800			(43)
Costero con cubertada máxima			0,840		(43)
<i>Buques de pasaje:</i>					
Buques de pasaje				0,80 a 0,87	(38)
Buq. de pasaje con muchas superestructuras.				0,88	(43)
"América"				0,795	(32)
"Mt. Vernon"				0,805	(32)
"Covington"				0,800	(32)
"Conte di Savoia"				0,868	(32)
Buque de pasaje				0,796	(39)
Buque de pasaje				0,869	(39)
<i>Cargueros:</i>					
Cargueros			0,81		(38)
Cargueros			0,78		(44)
Carguero tipo shelter				0,80	(43)
Carguero con cubertada alta			0,84		(44)
Mineraleros		0,810			(44)
"United Victory"	0,918				(45)
"Alcoa Planter"	0,917				(45)
"Sea Bass"	0,894				(45)
"Sheepshank"	0,934	0,920			(45)
"Boulder Victory"		0,872			(45)
"President Taft"		0,872			(45)
"L. McHenry Howe"		0,817			(45)
<i>Petroleros:</i>					
"Mission San Rafael"		0,820			(45)
"Camp Namanu"		0,906			(45)
<i>Remolcadores:</i>					
Remolcadores				0,76	(40)
"Ciclope"	0,735				(42)
"Remolcador 1"		0,761			(45)
"Remolcador 2"	0,769				(45)
"Remolcador"			0,722		(45)

TABLA III

Valores de f para pesqueros

BUQUES	Estado de carga	Valor de f	Referencia
Pesquero	Salida del caladero	0,760	(43)
Pesquero de altura	Salida de puerto	0,802	(46)
Pesquero de altura	A medio viaje de ida	0,792	(46)
Pesquero de altura	En el caladero	0,782	(46)
Pesquero de altura	A medio viaje de regreso	0,776	(46)
Pesquero de altura	Llegada a puerto	0,772	(46)
Atunero	En lastre	0,738	(45)
Atunero	Media carga	0,726	(45)
Atunero	Media carga	0,731	(45)
Atunero	Plena carga	0,706	(45)
Pesquero de madera	Rosca	0,814	

Si no se dispone de ninguna información, un valor medio de f es 0,78. Como regla general, para la estimación de f , debe tenerse en cuenta que f aumenta cuando el buque tiene grandes locales vacíos, lastre permanente en el fondo o grandes superestructuras y pesos altos. Por otra parte f es menor para buques afinados y con pesos concentrados hacia el interior y pocas superestructuras.

La fórmula [3.5] da el período de balance para movimientos pequeños de balance en aguas tranquilas, no teniendo en cuenta las resistencias pasivas ofrecidas por el buque y agua arrastrada por el mismo. A. M. Robb (47) estudió la variación del período de balance para pequeñas oscilaciones, cuando se tienen en cuenta las resistencias pasivas, encontrando para un destructor la relación:

$$T_1/T = 1,0017$$

donde T_1 = período de balance para pequeñas oscilaciones, teniendo en cuenta las resistencias pasivas.

Esta pequeñísima diferencia entre T y T_1 comprueba que la fórmula [3.5] es válida para pequeñas oscilaciones, con gran aproximación.

Para ángulos de inclinación no comprendidos en la zona de estabilidad inicial puede haber una diferencia sensible entre el período real de balance y el dado para pequeñas oscilaciones por la fórmula [3.5]. Robb determinó el valor del período T_θ cuando el ángulo de balance es θ , para buques con costados verticales en la flotación, encontrando el diagrama de la figura 3, que da los valores de T_θ/T en función de θ y del parámetro

$$a = \frac{BM}{2 \cdot GM}$$

donde puede apreciarse que para ángulos de balance inferiores a 10 grados el valor de T_θ es prácticamente superior a $0,95 \cdot T$.

Ello muestra que los valores de los períodos de balance medidos en la mar, con ángulos de balance normales, son muy próximos a los correspondientes al buque en igual estado de carga y en aguas tranquilas.

ANGULO DE BALANCE

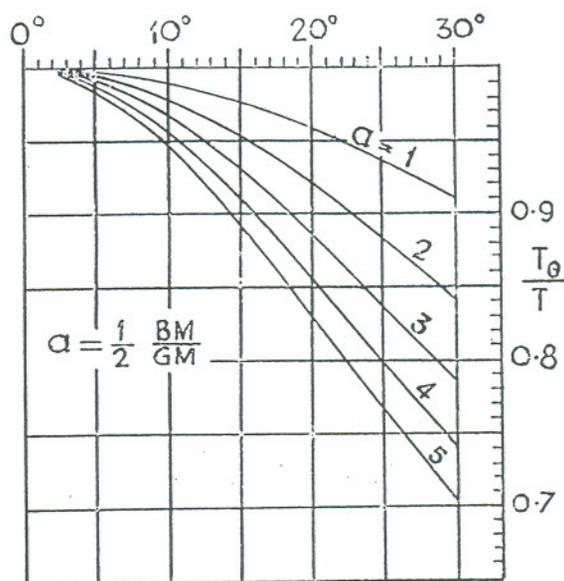


Fig. 3.—Variación del período de balance, en función del ángulo de balance, para buques de costados verticales en la flotación.

Wendel halló la fórmula:

$$\frac{T_\theta}{T} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{3 \cdot BM \cdot \theta^2}{8 \cdot GM}}} \quad [3.8]$$

en la cual θ es el ángulo de balance en radianes.

Puede deducirse fácilmente que la fórmula de Wendel coincide en sus resultados con el diagrama de Robb de la figura 3.

La fórmula [3.7] es de gran interés para la comprobación práctica de la estabilidad en la mar. Para determinar el valor de T es conveniente aprovechar varios balances consecutivos del buque, lo más regulares posible, que no sean de una amplitud excesiva, por ejemplo con ángulos de balance inferiores a 10 grados. De la fórmula [3.7] se deduce:

$$GM = \left(\frac{f \cdot B}{T} \right)^2 \quad [3.9]$$

Este método puede dar un valor de GM , con error inferior al 10 por 100 en la mayor parte de los casos.

En algunos países, Canadá por ejemplo, se emplea esa fórmula para calcular el valor de GM al juzgar la estabilidad de buques pequeños, empleando para ello valores fijos del coeficiente f .

En Canadá, en el sistema métrico, los valores de f usados son:

Para remolcadores pequeños, de eslora menor de 60 pies, $f = 0,73$.

Para pequeños buques de pasaje, de eslora inferior a 50 pies $f = 0,76$.

La fórmula [3.7] antes citada hace ver claramente la estrecha dependencia del período de balance con el valor de la estabilidad inicial GM . Ello da lugar a una aparente paradoja, ya que un valor elevado de GM , muy conveniente desde el punto de vista de la seguridad del buque y de su supervivencia en caso de producirse alguna entrada de agua, puede dar lugar a un corto período de balance que origine fuertes aceleraciones en los movimientos de balance, perjudiciales para la comodidad del pasaje y dotación y para la utilización del buque.

Para estudiar el efecto de las aceleraciones sobre el pasaje se hicieron varios viajes en el trasatlántico "Conte di Savoia", midiendo las aceleraciones que se producían. Expresando las aceleraciones como una fracción de la aceleración de la gravedad, se halló que con aceleraciones del orden de $0,1 \cdot g$ los pasajeros empiezan a estar incómodos. Con aceleraciones de $0,2 \cdot g$ a $0,3 \cdot g$, el mareo es bastante probable.

Por otra parte, si la estabilidad inicial de un buque es pequeña puede darse el caso de que durante el viaje, debido al consumo de combustible, provisiones, etc., GM se haga negativo, lo cual daría lugar a una escora con equilibrio indiferente, por lo que el buque estaría sujeto a peligrosos bandazos. Ello podría ser especialmente crítico para un buque de carga transportando una carga a granel, ya que sería muy probable un corrimiento de la carga que podría llegar a ser fatal. Ello hace ver que deben evitarse valores pequeños de GM , siendo conveniente procurar que en todas las situaciones de carga el valor de GM exceda a un cierto mínimo, del orden de 0,6 metros.

Al proyectar un buque es esencial considerar las condiciones meteorológicas que prevalecen en la zona donde ha de prestar sus servicios. En el Atlántico Norte las características del tiempo, analizadas por el Servicio Hidrográfico americano (47) son las que figuran en la tabla IV.

Para evitar que el buque esté sometido a fuertes movimientos de balance, en el caso de sincronismo, sería conveniente conseguir que el período de balance propio del buque fuese superior a los valores usuales del período de las olas. En la mayoría de los casos, y siempre en buques pequeños, ello conduciría

TABLA IV

Escala Beaufort	Viento	Tanto por ciento del tiempo en que actúa	Períodos de las olas correspondientes
0	Calma.	6 %	— —
1 a 4	Brisa.	38 %	Menor que 6 segundos.
5 y 6	Viento fresco.	22 %	De 6 a 7 segundos.
7 y 8	Viento duro.	20 %	De 7 a 8 segundos.
> 8	Tormenta.	14 %	Mayor que 9 segundos.

a valores de GM incompatibles con la seguridad del buque. Por ejemplo, en un pesquero de 6 metros de manga, con un valor del coeficiente $f = 0,76$, para $T = 12$ segundos resultaría:

$$GM = \left(\frac{0,76 \cdot 6}{12} \right)^2 = 0,14 \text{ m.}$$

valor muy inferior al que se considera indispensable para su seguridad, del orden de $GM = 0,6$ metros.

Por ello han de aceptarse en muchos casos valores de T iguales al período de ciertas olas, procurando que T tome el valor más elevado compatible con la seguridad del buque. En general puede decirse que cuanto mayor sea el francotordo efectivo de un buque, mayor será el período de balance que sea compatible con su seguridad. En grandes buques de pasaje, cruceros, cargueros de tipo shelter abierto, fruteros y otros buques análogos llegan a obtenerse valores altos de T que muy rara vez puedan ser alcanzados por los valores del período de las olas, lo cual explica en parte que dichos buques sean los de mejor comportamiento en la mar.

Como orientación sobre los valores normales del período T puede tomarse la relación de Kempf:

$$8 < T \sqrt{\frac{g}{B}} < 14$$

Valores del coeficiente de Kempf

$$C_K = T \sqrt{\frac{g}{B}}$$

mayores que 14 conducen a buques de movimientos de balance excesivamente lentos y escasa estabilidad inicial. Por otra parte si C_K es menor que 8 los movimientos de balance son muy bruscos, con aceleraciones que pueden llegar a ser incómodas para el pasaje y la dotación.

En la tabla V se incluyen los valores usuales del período de balance para buques de distintos tipos:

TABLA V

BUQUES	Desplazamiento toneladas	Valores de T segundos
Pesqueros	Menor que 1.000	6 a 8,5
Pesqueros	1.000-2.500	8 a 11
Remolcadores de altura	1.000-2.000	7,5 a 9
Remolcadores de rada	200- 600	6 a 8
Costeros	300-1.000	6 a 11
Petroleros a Plena Carga	10.000-50.000	10 a 13
Petroleros en lastre		6 a 9
Cargueros	2.000-35.000	7 a 13
Buques de pasaje	Menor que 10.000	10 a 15
Buques de pasaje	10.000-30.000	14 a 20
Buques de pasaje	30.000-50.000	18 a 28
Acorazados	20.000-40.000	13 a 18
Cruceros pesados	Mayor que 10.000	13 a 16
Cruceros ligeros	4.000-10.000	9 a 14
Destruyores	1.500- 4.000	7 a 11
Fragatas	1.500- 4.000	8 a 12
Guardacostas	300- 1.000	7 a 9
Lanchas rápidas		4 a 6

3.3. Brazo escorante producido por las olas de través.

Si se considera un buque atravesado a la mar (figura 4), sujeto a un tren regular de olas trocoidales, el agua, afectada de la velocidad orbital de sus partículas, al incidir sobre la obra viva del buque, da lugar a una cierta fuerza que producirá un momento escorante. Cuando el buque está en la posición de la figura, en el seno de la ola, su situación será la más crítica, ya que se sumarán las acciones escorantes del viento y las olas.

Considerando el eje X en el sentido de la manga y el eje Z positivamente hacia abajo, según la teoría trocoidal, la velocidad según OX de una partícula de agua, situada a la profundidad z será:

$$V_x = V_x \cdot e^{\frac{-2\pi z}{\lambda}} \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_x} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

El valor máximo de V_x se produce cuando el buque está sobre el seno de la ola, siendo entonces:

$$V_x = V_x \cdot e^{\frac{-2\pi z}{\lambda}} \tag{3.10}$$

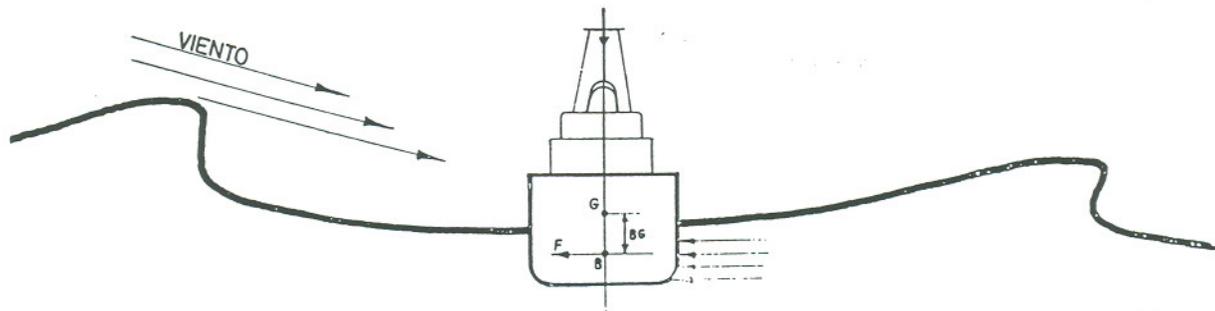


Fig. 4

La presión hidrodinámica, exclusiva de la presión hidrostática, es:

$$p = \frac{1}{2} \rho \cdot V_s^2 \tag{3.11}$$

Sustituyendo V_s por su valor:

$$V_s = \sqrt{\frac{g\pi}{2\lambda}} \cdot h$$

y llevando [3.10] a [3.11] se halla:

$$p = \frac{\rho g \pi}{4\lambda} \cdot h^2 e^{\frac{-4\pi z}{\lambda}} \tag{3.12}$$

La fuerza total ejercida por esa presión, al actuar sobre el costado del buque será:

$$F = \iint p \cdot \cos \alpha \cdot dS \tag{3.13}$$

donde $\cos \alpha$ es el coseno director de la normal al elemento de área dS , con relación a la dirección OX.

La distribución vertical de presiones hidrodinámicas tiene la forma exponencial de la fig. 5. Ello significa que el centro de presión, supuesto el plano de deriva proyectado un rectángulo, estará situado en

un punto ligeramente por encima de la mitad del calado. Puede suponerse por ello, sin gran error, que la resultante F actúa en el centro de carena B , de tal

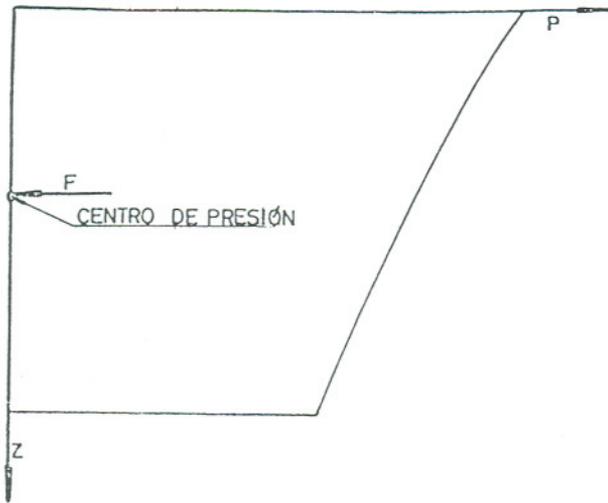


Fig. 5.—Distribución vertical de presiones hidrodinámicas, a partir de la flotación.

forma que el momento escorante producido por las olas vendrá dado por la expresión:

$$M = F \cdot BG \quad [3.14]$$

ya que se admite que el eje de oscilación transversal pasa por el centro de gravedad del buque.

Con la misma hipótesis anterior, el valor de F será:

$$F = \int_0^H \frac{\rho g \pi}{4 \lambda} h^2 \cdot e^{-\frac{4 \pi z}{\lambda}} \cdot L \cdot dz =$$

$$= L \rho g \frac{h^2}{16} \left[\frac{-4 \pi H}{\lambda} \right] \quad [3.15]$$

El brazo escorante debido a las olas es:

$$b_o = \frac{F \cdot BG}{\Delta} \quad [3.16]$$

Sustituyendo el valor de F en [3.16] y desarrollando en serie la exponencial, se obtiene fácilmente:

$$b_o = \frac{\pi \rho g}{4} \cdot \frac{BG}{B \cdot C_n} \cdot \frac{h^2}{\lambda} \left[1 - \varepsilon + \frac{3}{2} \varepsilon^2 - \dots \right] \quad [3.17]$$

donde

$$\varepsilon = \frac{2 \pi H}{\lambda}$$

En casos extremos de tiempo, con valores grandes de λ , en barcos de proporciones normales, ε to-

mará valores pequeños, de forma que se podrá escribir con suficiente aproximación:

$$b_o = 0,8 \left(\frac{BG}{B \cdot C_n} \cdot \frac{h^2}{\lambda} \left(1 - \frac{2 \pi H}{\lambda} \right) \right) \quad [3.18]$$

La expresión hallada concuerda con los resultados sancionados por la experiencia, esto es:

El efecto escorante es afectado adversamente por los siguientes factores:

- La altura de las olas = h .
- La pendiente de las olas = h/λ
- La distancia vertical entre los centro de carena y gravedad.

Son factores favorables al comportamiento del buque:

- La manga.
- El coeficiente de afinamiento, C_n .
- El calado.

Las curvas de la figura 6 representan, en función de la longitud de las olas, los valores que toma el

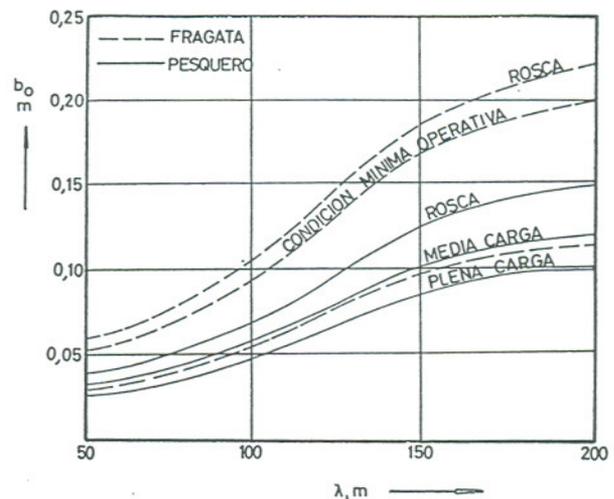


Fig. 6.—Variación del brazo escorante inicial, producido por las olas, en función de la longitud de las olas.

brazo escorante b_o para un pesquero de 35 metros de eslora y para una fragata de 87,5 metros de eslora, tomando las alturas de las olas según la escala de Petersen. En ambos buques se observa que los valores de b_o son crecientes con la longitud y altura de las olas, disminuyendo apreciablemente al aumentar el calado.

La magnitud de los brazos de palanca calculados, para condiciones extremas de la mar, de un orden comparable a los brazos adrizantes de muchos buques, hace ver claramente la gran importancia que este efecto puede tener en la seguridad de un buque en la mar.

3.4. Modificación de los valores de los brazos de palanca, por efecto de las olas.

En el cálculo usual de los brazos de palanca del par de estabilidad, para distintos ángulos de inclinación, se hacen las siguientes hipótesis:

a) Se consideran flotaciones paralelas a la línea de base, despreciando así el efecto del posible cambio de asiento del buque.

b) Se supone que la superficie del mar es horizontal, prescindiendo por tanto de los efectos dinámicos producidos por las olas.

Para buques normales, y calculando las carenas inclinadas para flotaciones paralelas a las correspondientes a un asiento promedio de los que el buque experimenta en sus diversas condiciones de servicio, no se cometen errores de importancia al no tener en cuenta el verdadero asiento del buque. Más aún, si las carenas inclinadas están calculadas para flotaciones paralelas a la quilla, y el buque tiene en realidad un cierto asiento por la popa, el GM real del buque será superior al GM dado por las curvas de estabilidad calculadas, por lo que el error cometido no sería perjudicial para la seguridad del buque.

La influencia de la acción de las olas sobre las curvas de estabilidad tiene una importancia fundamental. Cuando la superficie del mar está ondulada, al inclinarse el buque por actuar sobre él alguna fuerza perturbadora, la forma de la parte sumergida de la carena será esencialmente variable, por lo que las magnitudes instantáneas de los brazos adrizantes serán variables y distintas de los valores calculados, correspondientes a aguas tranquilas.

La modificación de los brazos adrizantes es máxima cuando el buque navega con olas longitudinales de longitud igual o próxima, a la eslora. Lewis (48) considera que olas de longitudes menores que $3/4 \cdot L$ no producen movimientos importantes del buque en ningunas circunstancias, comprobándose que las olas más peligrosas son aquellas de longitud próxima a la eslora. Con mares irregulares, los efectos producidos por las distintas olas componentes del espectro correspondiente, se superpondrán entre sí, produciéndose una cierta compensación entre ellos, de tal forma que no podrá existir una disminución sensible de la estabilidad del buque que llegue a subsistir por un intervalo apreciable de tiempo. La modificación de los brazos adrizantes puede llegar a ser peligrosa cuando el buque navega en un sistema de olas regulares. Estas circunstancias pueden darse en la práctica cuando un fuerte viento ha estado soplando durante un largo espacio de tiempo, dando lugar a un sistema regular de olas, generalmente de longitud y altura considerables, formando lo que se llama una mar tendida o mar de fondo.

Si estas olas regulares son de proa, la modificación de los brazos adrizantes tendrá lugar en una forma alternativamente favorable y desfavorable, oscilando los valores de los brazos adrizantes del buque de una forma rápida, sin que el buque permanez-

ca en una posición desfavorable durante un tiempo apreciable. Con mar de popa, sin embargo, si la velocidad del buque, con respecto a las olas, es pequeña, puede llegar a encontrarse éste, durante un período de tiempo considerable, en una situación de estabilidad que pudiera llegar a ser muy inferior a la estudiada en su proyecto. La situación más peligrosa que puede presentarse es cuando el buque se halla en la condición de quebranto, con mar de popa y olas de longitud igual a la eslora del buque, teniendo una cresta situada en las proximidades de la cuaderna maestra. Es un hecho conocido que los buques pequeños y rápidos pueden verse en peligro de zozobrar si corren un temporal con mar de popa o aleta, si llegan a verse en una situación casi estática de sincronismo con las olas, cuando el período aparente de éstas llegue a ser muy grande.

La fig. 7 representa tres secciones transversales de un buque situado sobre una ola de longitud igual a

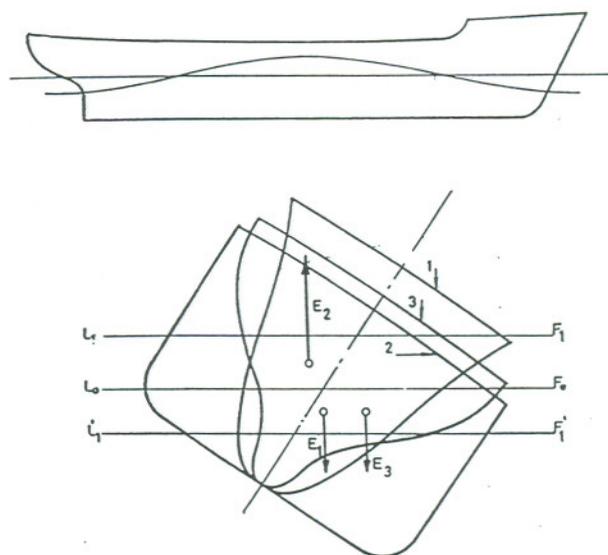


Fig. 7

su eslora, en la condición de quebranto. L_0, F_0 es la flotación correspondiente a aguas tranquilas con una cierta inclinación. Las secciones 1, 2 y 3 corresponden, respectivamente, a la parte de proa, la cuaderna maestra y la parte de popa del buque. En la condición de quebranto, las nuevas flotaciones serán la L_1, F_1 , para la sección 2 y la L'_1, F'_1 para las secciones 1 y 3. Con relación a la flotación L_0, F_0 , en aguas tranquilas, el buque gana un empuje E_2 en la zona central y pierde los empujes E_1 y E_3 en las zonas extremas. El efecto conjunto de estas fuerzas produce un par escorante que disminuye la estabilidad calculada para el buque en esa inclinación y en aguas tranquilas.

El cambio de la posición del centro de empuje del buque en las olas fue estudiado primero por Pollard y Dudebout (50). Edgar (51) fue, sin embargo, el primero en aplicar este estudio al cálculo de la pérdida de estabilidad del buque en las olas, calculando para

ello los trazos adrizantes de un destructor de 77,8 metros de eslora, en la condición de quebranto, con olas de longitud igual a la eslora, y altura $h = L/20$. Las curvas de estabilidad del buque, para aguas tranquilas (curva I) y sobre la cresta de la ola (curva II), se muestran en la fig. 8, observándose una pérdida de

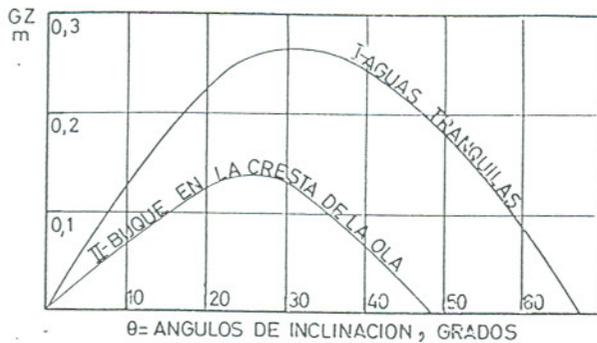


Fig. 8.—Disminución de la estabilidad de un destructor situado sobre la cresta de una ola. $\lambda = L = 77,8$ m.; $h = L/20$.

estabilidad dinámica del orden del 70 por 100, y una disminución del valor de GM desde 0,82 a 0,37 metros.

Baker (52) comprobó que, cuando el período de las olas y el período de balance del buque no son muy distintos, la pérdida de GM y la disminución en los valores de los distintos GZ , es independiente del valor inicial de GM , teniendo lugar la máxima pérdida de estabilidad cuando el buque está posado sobre la cresta de una ola, siendo entonces muy vulnerable a los efectos escorantes.

El problema de la pérdida de estabilidad en la condición de quebranto es particularmente grave para buques de formas afinadas. Paulling (53) y (54) ha estudiado este problema, realizando ensayos con modelos en la Universidad de California. Para un buque atunero que zozobró en su primer viaje, Paulling calculó, en el estado de carga correspondiente a la zozobra, las curvas de estabilidad para las tres condiciones de aguas tranquilas, buque sobre el seno de la ola y buque sobre la cresta (fig. 9). Puede observarse cómo a pesar de ser el GM del buque en aguas tranquilas 0,63 metros, con un ángulo de estabilidad



Fig. 9.—Efecto de las olas longitudinales sobre la estabilidad de un buque atunero. $\lambda = L = 30,2$ m.; $h = L/20$.

nula de 60 grados, valores ambos que podrían considerarse satisfactorios, la curva de estabilidad del buque sobre la cresta de la ola es totalmente insatisfactoria, lo que justifica que el buque zozobrase en su primer viaje. Paulling hace notar también que la disminución de estabilidad en la condición de quebranto puede agravarse en algunos buques al modificarse el asiento como consecuencia del movimiento longitudinal que pueda experimentar el centro de carena, al cambiar la forma de ésta en las olas.

Actualmente el estudio de la reducción de estabilidad producida por las olas ha adquirido gran incremento, sobre todo en Alemania. La zozobra del carguero "Irene Oldendorff", en la noche del 30 al 31 de diciembre de 1951, puede explicarse solamente teniendo en cuenta la disminución de la estabilidad del buque producida por las olas (55). El buque zozobró con un fuerte temporal y mar de popa, quedando apoyado en el fondo. Al ser reconocido posteriormente por los buzos, se vió que el casco no presentaba ninguna avería que pudiese justificar el hundimiento del buque. Por otra parte, la curva de estabilidad estática del "Irene Oldendorff", en el momento de la zozobra, satisfacía los criterios de estabilidad normalmente aplicados a estos buques.

En el caso del hundimiento del buque escuela a vela "Pamir", se comprobó que la pérdida de estabilidad en las olas tuvo una influencia importante en la pérdida del buque (56) y (57). La zozobra del motorcero "Lohengrin", acacida a la entrada del puerto de Kiel, el 14 de enero de 1963, con mar de popa, viento de fuerza 6 a 8, y olas de unos 2 metros de altura, fue explicada por la disminución de estabilidad debida a las olas, reproduciéndose prácticamente las circunstancias de la zozobra en ensayos realizados con un modelo del buque siniestrado (58) y (59).

En Alemania, y en casos especiales de buques de características poco frecuentes, se hacen estudios de sus condiciones de estabilidad en las olas, para poder juzgar si dicho buque puede ser considerado satisfactorio en lo que respecta a estabilidad. Como ejemplo puede citarse la investigación de las condiciones de estabilidad del velero "Gorch Fock" (60).

Arndt, Roden (61) y Kastner (62) han estudiado la pérdida de estabilidad en las olas por medio de ensayos con modelos. En dichos ensayos se han medido los brazos adrizantes considerando sólo las presiones hidrostáticas, prescindiendo de la influencia del efecto Smith, ya que se encontró que la incertidumbre de los valores obtenidos debida al sistema de medida, era del mismo orden que el posible efecto de tener en cuenta en los cálculos la variación del peso específico aparente del agua, debida al movimiento orbital de las partículas de líquido. En la condición de quebranto el efecto Smith disminuirá el valor del empuje debido a la parte central y aumentará el debido a las partes extremas del buque, por lo cual ello agrava la pérdida de estabilidad producida por las olas en esa condición.

Wendel (4) midió los brazos adrizantes de un modelo, inclinado 30 grados, mientras era adelantado por un tren de olas longitudinales de longitud igual a la eslora del modelo, y de pendiente igual a 1/20. La variación del momento adrizante para ese ángulo se indica en la fig. 10, observándose que pasa por

g = MOMENTO ADRIZANTE MEDIO, CON OLAS LONGITUDINALES
b = MOMENTO ADRIZANTE EN AGUAS TRANQUILAS

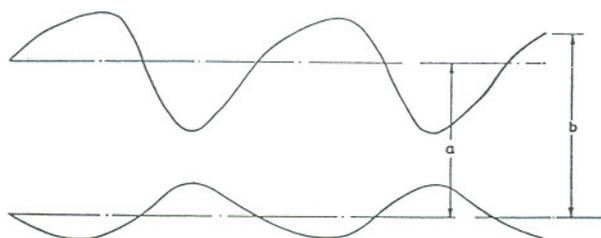


Fig. 10.—Variación del momento adrizante de un buque, con olas longitudinales.

un máximo en la condición de arrufo, con el buque situado sobre un seno de la ola, y por un mínimo en la condición de quebranto. El valor medio del momento adrizante en las olas era sensiblemente inferior al valor correspondiente a aguas tranquilas. Los valores medios de los brazos adrizantes, con olas longitudinales, pueden tomarse como valores eficaces de los mismos, válidos cuando un buque está capeando un temporal con la proa a la mar.

Arndt (63) y (64) analizó los resultados de una serie de cálculos sistemáticos realizados por el Instituto Técnico de Hannover, sobre el efecto en la estabilidad de un carguero rápido, de coeficientes de bloque 0,63, producido por la acción de olas longitudinales. Los cálculos se hicieron con el auxilio de un computador digital IBM 650, para un buque de 100 metros de eslora, 16 metros de manga, haciendo variar el desplazamiento y la relación manga/puntal = Q . Los cálculos se hicieron para los desplazamientos de 3.200, 4.800, 6.400, 8.000 y 9.600 metros cúbicos, y los valores de Q , 1,2, 1,4, 1,6 y 1,8. Se hizo variar igualmente la altura de las olas, haciendo los cálculos para olas de 5; 7,5; 10; 12,5 y 15 metros de altura. Los principales resultados obtenidos en estos ensayos son los siguientes:

a) La pérdida de estabilidad, para el buque sobre la cresta de la ola, es más importante para buques con poco francobordo.

b) El valor eficaz de GZ , con olas longitudinales de proa, es el promedio de los valores correspondientes al buque en la cresta y en el seno de la ola. En buques de poco francobordo dicho valor es inferior al valor correspondiente a aguas tranquilas. Con mucho francobordo, dicho valor puede llegar a ser mayor que el valor de aguas tranquilas.

c) Puede afirmarse en general que, para un mismo buque, la diferencia entre los valores de GZ en el

seno y en la cresta de la ola aumenta con la pendiente, y por tanto con la altura de las olas consideradas.

d) Los valores numéricos de las diferencias entre los brazos, adrizantes, en el seno y en la cresta de la ola, han sido muy variables, tomando valores muy considerables. Los valores más frecuentes eran del orden de 0,5 metros, aunque se han llegado a dar valores de 2 metros, para olas de la máxima altura.

Del análisis de las curvas de estabilidad correspondientes al buque en aguas tranquilas y en la cresta de la ola, se puede deducir fácilmente la pérdida de estabilidad dinámica del buque para diversos desplazamiento y pendientes de las olas. Tomando como ángulo límite 40 grados, puede calcularse por integración la pérdida de estabilidad dinámica del buque hasta ese ángulo límite. En la figura 11 se ven los

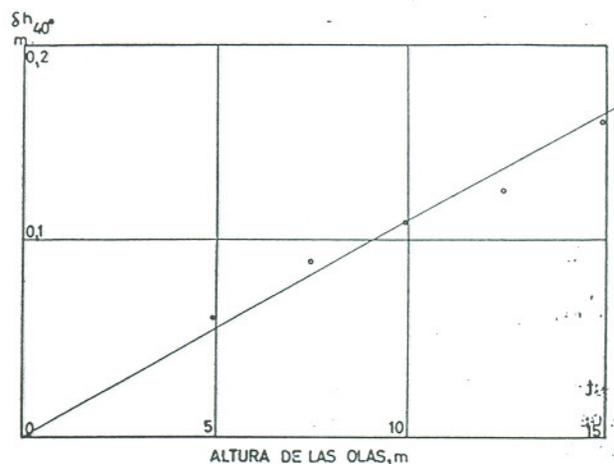


Fig. 11.—Pérdida de estabilidad dinámica, hasta el ángulo límite de 40 grados, producida por olas longitudinales, en la situación de quebranto.

resultados obtenidos por el autor, comprobándose que la pérdida de estabilidad dinámica, hasta el ángulo límite de 40 grados, δh_{40° puede considerarse como función lineal de la altura de las olas. Debe hacerse notar que la disminución de estabilidad dinámica calculada para este buque excede en muchos casos al mínimo de estabilidad dinámica determinado por el conocido, y generalmente aplicado, criterio de Rahola, lo que justifica que numerosos barcos hayan zozobrado a pesar de satisfacer con cierto margen el mínimo de Rahola.

Con motivo de la desaparición de un buque de carga, ocurrida en invierno, en el Atlántico Norte, cuando el buque transportaba una carga de grano, se hizo una investigación de las condiciones de estabilidad de ese buque. Las circunstancias meteorológicas prevalecientes en el momento de la desaparición del buque correspondían a mar gruesa por la popa. Se estudió la variación de la estabilidad del buque, al variar la carga embarcada, para cargas próximas a la correspondiente a plena carga. Se calculó igualmente por medio de un computador I. B. M. la estabilidad del buque, situado sobre la cresta de una ola, en la situación de quebranto, tomando una ola de longitud

igual a la eslora del buque, y de altura $h = L/20$. Los resultados pueden verse en la fig 12. Al aumentar el desplazamiento del buque, entre 14.000 y 15.000 toneladas, se observó que su estabilidad dinámica, hasta el ángulo límite de inclinación de 40 grados, disminuía sensiblemente, desde 141 milímetros hasta 50 milímetros. En el mismo intervalo la pérdida de

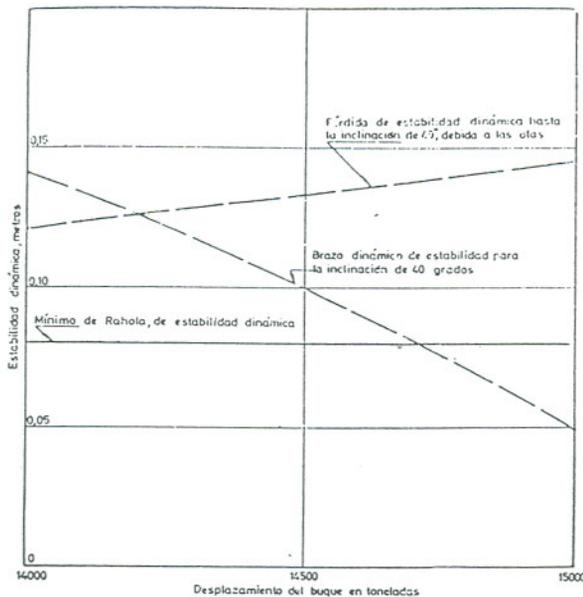


Fig. 12.—Comparación de la estabilidad dinámica de un buque de carga con la pérdida de estabilidad dinámica producida por olas sincronas de popa.

estabilidad dinámica, hasta la inclinación de 40 grados, para la condición de quebranto, aumentaba desde 121 milímetros hasta 145 milímetros, lo cual demuestra claramente que las condiciones de seguridad del buque varían drásticamente en ese intervalo, dependiendo muy estrechamente de un pequeño porcentaje de la carga total embarcada. Este ejemplo demuestra también con suficiente claridad la falta de seguridad que ofrece el conocido mínimo dinámico establecido por Rahola.

Boie (65) hace notar que la reducción de brazos adrizantes debido a las olas longitudinales es un peligro mucho mayor para la seguridad del buque que los movimientos de balance del mismo en olas transversales sincronas. El análisis de las circunstancias meteorológicas y posibles acciones escorantes presentes en la zozobra de 16 buques mostró que en 10 existían olas longitudinales y sólo en dos, mar de través, comprobándose así que la existencia de olas longitudinales y la reducción de brazos adrizantes que ello origina, es la causa más importante de accidentes. Debe hacerse notar que los diez barcos citados se perdieron en circunstancias muy similares. En todos los casos había fuerte mar de popa o aleta, tratándose de buques de escaso franco bordo. En algunos casos el viento no excedía la fuerza 5 de la escala Beaufort.

Otro método empleado para medir la disminución de brazos adrizantes debida a la olas es el de efectuar medidas reales en la mar si bien este método sólo se ha utilizado con carácter experimental (66).

Las consideraciones expuestas hasta ahora, dada la importancia de la disminución de estabilidad con mar de popa, así como de la acción escorante de las olas de través, hacen ver la imperiosa necesidad de tener en cuenta preferentemente la influencia de las olas en la estabilidad, al juzgar las condiciones de estabilidad de un buque.

Los cálculos requeridos para determinar los efectos de las olas longitudinales en la estabilidad son bastante laboriosos usando los métodos tradicionales de cálculo, lo que explica que hasta ahora se hayan efectuado pocos estudios de este tipo. El cálculo de la estabilidad del buque en las olas puede hacerse con facilidad y con pequeño coste mediante el empleo de computadores electrónicos. Las deducciones obtenidas de los escasos cálculos realizados por este procedimiento hacen patente la necesidad de elevar las exigencias mínimas de estabilidad si se quiere que el buque esté razonablemente a cubierto de las acciones escorantes de las olas entre las que ha de prestar sus servicios.

A pesar de la gran importancia de las acciones de las olas, puede decirse que actualmente ninguno de los criterios de estabilidad existentes está basado en la consideración de esas acciones, ya que el efecto de las olas interviene sólo de una forma indirecta al fijar un cierto ángulo máximo de balance en algunos criterios. No es de extrañar, por lo tanto, que numerosos buques se pierdan en circunstancias duras de mar, a pesar de satisfacer criterios de estabilidad considerados de toda confianza. A este respecto se puede citar a Bigelow y Edmonson (67).

"En resumen, siempre prevalecerá la vieja regla que dice: de una tempestad, el marino ha de temer a las olas y no al viento."

REFERENCIAS

- (1) "Problems of Capsizing with special reference to the Toya Maru disaster", *J. S. N. A. J.*, 60 aniversario, volumen VI, pág. 159.
- (2) Rahola, J.: "The judging of Stability of Ships", Helsinki, 1939.
- (3) Manley, C. V.: "Losses of Small Ships", *R. I. N. A.*, 1958.
- (4) Wendel, K.: "Safety from Capsizing", *F. B. W. 2*.
- (5) Skinner, H.: "The Safety of Small Ships", *R. I. N. A.*, 1951.
- (6) Hunter, A., y Eddie, G. C.: "Fishing Vessel Development", *R. I. N. A.*, 1959.
- (7) Spanner, W. F.: "Some notes on the design of Trawlers and Drifters with particular reference to Seaworthiness and Stability", *R. I. N. A.*, 1947.
- (8) Burrill, L. C.: "Seaworthiness of Collier type Ships", *R. I. N. A.*, 1931.
- (9) Holt, C. F.: "Stability and Seaworthiness", *R. I. N. A.*, 1925.
- (10) Pierrottet, E.: "A standard of Stability for Ships", *R. I. N. A.*, 1935.
- (11) Nickum, G. C.: "Proposed Stability Criteria", *F. B. W. 1*, págs. 320-322.
- (12) Burgess, N. H.: "Tanker Design from a Stability point of view", *N. E. C. I. E. S.*, 1948-1949.
- (13) Takagi, A.: "Notes on Stability", *F. B. W. 2*.
- (14) Watanabe, K.: "A proposed standard of Stability for Passenger Ships", *J. S. N. A. J.*, vol. 99, págs. 29-46.
- (15) "Normas de estabilidad de los buques de altura y costeros (buques de carga y pesqueros) de la U. R. S. S.", *Revista de Información de la Empresa Nacional Elcano*, núms. 195 a 199, 1964.
- (16) Sarchin, T. H., y Goldberg, L. L.: "Stability and Buoyancy Criteria for U. S. Naval Surface Ships", *S. N. A. M. E.*, 1962, págs. 418-458.
- (17) "Criterio Provisional de Estabilidad para los buques de la Marina de Guerra Española, El Ferrol, 1958.
- (18) Danckwardt, E.: "Stabilitätsvorschriften verschiedener Länder", *Hansa*, 1959, pág. 2.364.
- (19) "National Requirements for Intact Stability of Ships", *I. M. C. O.*, 1964.

- (20) Mockel, W.: "Behaviour of Trawlers at Sea", *F. B. W.* 1, págs. 326-336.
- (21) Niedermair, J. C.: "Stability of ships after damage", *S. N. A. M. E.*, 1932.
- (22) Lackenby, H.: "Formation of ice on trawlers", *F. B. W.* 2, pág. 511.
- (23) "Trawler Icing Report", *B. S. E. A.*, Report núm. 221, 1957.
- (24) O'Dogherty, P.: "Influencia de las carenas líquidas en la estabilidad transversal del buque", *Ingeniería Naval*, Enero, 1955.
- (25) Instrucciones para el cumplimiento de las condiciones que han de satisfacer los buques mercantes nacionales para efectuar transportes de granos. Dirección General de Buques. Subsecretaría de la Marina Mercante. Madrid, 1964.
- (26) Cartwright, D.: "Ocean waves", Part I, *N. P. L.* Report.
- (27) Hogben, N.: "Sea State Observation Studies on the S. N. Cairndhu and R. V. Ernest Holt", *N. P. L.* Ship Report 32.
- (28) Cornish, V.: "Ocean Waves", Cambridge, 1934.
- (29) Sverdrup, H. U., y Munk, W. H.: "Wind, sea and swell. Theory of relations for forecasting". Publicación *H. O.*, número 601, U. S. N. Hydrographic Office, 1947.
- (30) Pierson, Neumann y James: "Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics". Publicación *H. O.*, número 603, U. S. N. Hydrographic Office, 1955.
- (31) "Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiete der Schiffsstabilität", *S. T. G.*, Hamburgo, 1955.
- (32) Rossell, H., y Chapman, L. B.: "Principles of Naval Architecture", vol. II, pág. 9.
- (33) Williams, A.: "An investigation into the motions of ships at sea", *R. I. N. A.*, 1953.
- (34) Kent, J. L.: "Appropriate ship lengths for minimum pitching and maximum seaworthiness", *R. I. N. A.*, 1934.
- (35) Schnadel, G.: "Ocean waves, Freeboard and Strength of ships", *R. I. N. A.*, 1938, pág. 387.
- (36) De Santis, R., y Russo, M.: "Rolling of the S. S. Corte di Savoia in tank experiments and at sea", *S. N. A. M. E.*, 1936.
- (37) Vedeler, G.: "Notes on the rolling of ships", *R. I. N. A.*, 1925, pág. 166.
- (38) Blagoveshchensky, S. N.: "Ship Motions".
- (39) Barnaby, K. C.: "Basic Naval Architecture", 1930.
- (40) Thode, H.: "Stabilität und Rollschwingungen", *Hansa*, Mayo, 1963.
- (41) Bledsoe, M., Bussemaker, O., Cummins, W.: "Seakeeping trials on three Dutch destroyers", *S. N. A. M. E.*, 1960.
- (42) "Datos de experiencias de estabilidad realizados por la Marina".
- (43) Voss, W.: "Stabilität", Escuela de Náutica de Bremen.
- (44) Arkenbout, Neuerburg y Vossnack: "The design of Merchant Ships".
- (45) Laurenson, R.: "Ship rolling constants", *Marine Engineering and Shipping Review*, Mayo, 1949, pág. 61.
- (46) Mockel, W.: "Behaviour of trawlers at sea", parte II, *F. B. W.* 2, pág. 413, Londres, 1960.
- (47) Robb, A. M.: "Theory of Naval Architecture", 1952.
- (48) Basset, R. P., y Hodgkinson, F. P.: "New studies of Ship Motions", *S. N. A. M. E.*, 1935, pág. 286.
- (49) Lewis, E.: "Ship speeds in irregular seas", *S. N. A. M. E.*, 1955.
- (50) Pollard, S., y Dubebout: "Théorie du Navire", Paris, 1892.
- (51) Edgar, G. R.: "Effect of Waves on Transverse Stability", *I. E. S. S.*, 1920, págs. 149-180.
- (52) Baker, G. S.: "The effective wave slope", *R. I. N. A.*, 1941.
- (53) Paulling, J. R.: "The transverse stability of a Ship in a Longitudinal Seaway", *Journal of Ship Research*, Marzo, 1961, págs. 37-49.
- (54) Paulling, J. R.: "Transverse Stability of Tuna Clippers", *F. B. W.* 2, págs. 489-495.
- (55) Wendel, K.: "Stabilitätsverlusten in Seegang und durch Koksdecklast", *Hansa*, 1964, págs. 2.009-2.022.
- (56) Roden, S.: "Beeinflussung der Stabilität der Pamir durch Seegang", *Hansa*, 1958, págs. 435-437.
- (57) Platzöder, W., y Wendel, K.: "Der Untergang des Segelschiffes Pamir", *Hansa*, 1958, págs. 430-433.
- (58) Boie, C.: "Stabilitätsuntersuchungen zum Kentern des Motorschiffes "Lohengrin", *Hansa*, 1964, páginas 1.205-1.212.
- (59) Kastner, S.: "Modellversuche in achterlichem Seegang mit dem Küstenmotorschiff "Lohegrin", *Hansa*, 1964, páginas 1.212-1.217.
- (60) Arndt, B., Kastner, S., y Roden, S.: "Die Stabilitätsprüfung des Segelschiffes "Gorch Fock", *Schiffstechnik*, 1960, págs. 177-190.
- (61) Arndt, B., y Rodem, S.: "Stabilität bei vor- und achterlichem Seegang", *Schiffstechnik*, 1958, págs. 192-199.
- (62) Kastner, S.: "Kenterversuche mit einem Modell in naturlichem Seegang", *Schiffstechnik*, 1962, págs. 161-164.
- (63) Arndt, B.: "Einige Berechnungen der Seegangstabilität", Symposium sobre Teoría del buque. Universidad de Hamburgo, 1962.
- (64) Arndt, B.: "Systematische Berechnungen der Seegangstabilität für ein Frachtschiff mit einer Völligkeit von 0.63", *Hansa*, 1964, págs. 2.479-2.491.
- (65) Norrby, R.: "The Stability of Coastal Vessels", *R. I. N. A.*, 1962, págs. 536-538.
- (66) Arndt, B., Kastner, S. y Roden, S.: "Stabilitätsmessung auf Schiffen", *Hansa*, 1960, págs. 2.441-2.446.
- (67) Bigelow, H. B., y Edmonson, W. T.: "Wind Waves at sea; Breakers and Surf", U. S. N. Hydrographic Office, publicación H. O. 602, 1947.

Abreviaturas empleadas en las Referencias:

- B. S. R. A.: British Shipbuilding Research Association.
 F. B. W.: Fishing Boats of the World.
 I. E. S. S.: Institution of Engineers and Shipbuilders of Scotland.
 I. M. C. O.: Intergovernmental Maritime Consultative Organization.
 J. S. N. A. J.: Journal of the Society of Naval Architects of Japan.
 N. E. C. I. E. S.: North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders (Inglaterra).
 N. P. L.: National Physical Laboratory (Gran Bretaña).
 R. I. N. A.: Royal Institution of Naval Architects (Inglaterra).
 S. N. A. M. E.: Society of Naval Architects and Marine Engineers (Estados Unidos).
 S. T. G.: Schiffbautechnische Gesellschaft (Alemania).
 U. S. N.: United States Navy.