

# EL DESARROLLO DE LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD DEL BUQUE A LA LUZ DE LOS PROGRESOS DE LA ARQUITECTURA NAVAL

Alberto Francescutto – Università degli Studi di Trieste

*Accidit in puncto quo non contingit in anno*  
Pierrottet, A Standard of Stability for Ships, 1935

## Sumario

En esta memoria son presentados de manera sintética los desarrollos conexos con la estabilidad del buque y su aplicación a la formulación de criterios de estabilidad a la luz de los progresos del conocimiento en general y de la Arquitectura Naval en particular. Es ilustrado el estado actual de la normativa a nivel internacional y presentados los previsibles desarrollos futuros. Viene dado relieve a las contribuciones de la escuela Italiana y del Autor en particular en los últimos treinta años de investigación. Se evidencia además el hecho que una parte importante de esta historia, la introducción del metacentro, se ha desarrollado en Perú alrededor de la fin del Virreinato.

## 1. Introducción

Aunque los conceptos básicos de la flotabilidad fueran conocidos de un punto de vista empírico mucho tiempo antes, las leyes fundamentales de la hidrostática de los cuerpos flotantes fueron formuladas por Arquímedes en el 300 A.C. La reciente disponibilidad de un texto extraviado ha permitido descubrir que él también puso los fundamentos de la estabilidad de los cuerpos flotantes introduciendo el concepto de equilibrio de fuerzas y momentos. Las aplicaciones hechas para él concernieron principalmente los sólidos geométricos, y en particular los paraboloides, a cuyos él era capaz de aplicar los métodos matemáticos desarrollados para él. Se trató, evidentemente, de la noción de estabilidad estática en cuanto los conceptos físicos de trabajo y energía no eran conocidos (por una bibliografía más completa sobre esta parte, vease [1]).

## 2. La estabilidad “estática”

### 2.1 Los enfoques alternativos de Bouguer y Eulero

Muchos siglos después, al principio del siglo XVII, Stevin introdujo los primeros rudimentos de lo que se habría llamado metacentro, que jugará una función esencial por la estabilidad de los buques. Fueron pero Bouguer en el 1746 con su texto *Traité du Navire, de sa construction et de ses mouvements* (Fig. 1) y Euler en el 1749 con su *Scientia navalis seu tractatus de construendis ac dirigendis navibus*, que pusieron casi simultáneamente las bases de la moderna teoría de la estabilidad del buque. El método de Bouguer fue basado en

El desarrollo de los criterios de Estabilidad del Buque a la luz de los progresos de la Arquitectura Naval

el concepto de metacentro, mientras aquel de Eulero sobre el concepto de momento adrizante<sup>1</sup>. En la impostación moderna, por cuanto todo pueda ser descrito eficazmente en términos del momento adrizante, todavía se mantiene la subdivisión entre estabilidad inicial, o a los ángulos infinitesimales, que es basada sobre la noción de metacentro, y la estabilidad a los grandes ángulos, que es basada sobre el momento adrizante.

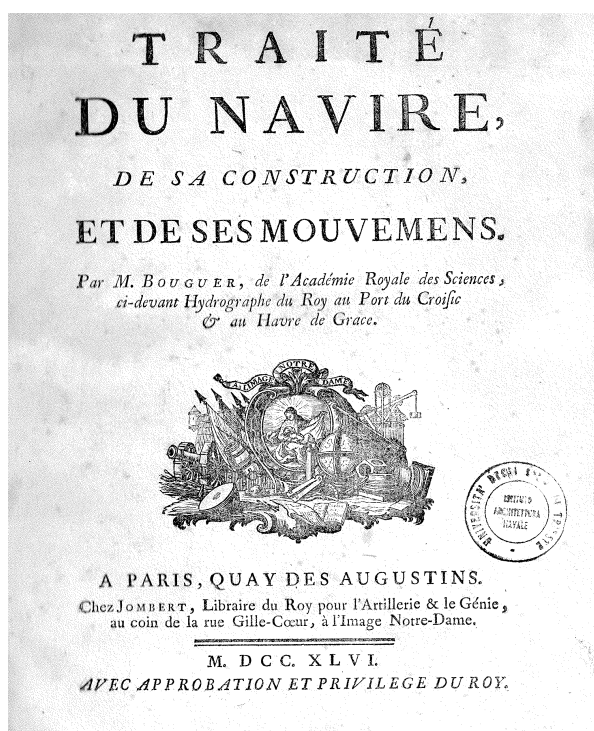


Fig. 1 El texto de Bouguer

El metacentro permite en efecto una fácil visualización del requisito de estabilidad inicial. Todavía observamos que la diferencia de método entre ángulos infinitesimales y grandes ángulos de escora reside en la diferente dificultad de cálculo necesario para evaluar los elementos necesarios.

Casi ciento años antes el velero de guerra sueco Wasa hundió, después de haber recorrido apenas una milla en su viaje inaugural, por defecto de estabilidad a grandes ángulos. Se trata de un problema que también volverá a la tapa mucho tiempo después de los descubrimientos de Bouguer y Eulero, a demostrar la dificultad de parte de los proyectistas de metabolizar y transformar en práctica corriente los nuevos conceptos.

<sup>1</sup> En realidad, en su libro están contenidas, entre otras, las siguientes ideas:

- la idea del centro de carena y del metacentro como puntos diferentes del centro de gravedad;
- una teoría de la estabilidad basada en la dirección del momento restaurador en una pequeña escora;
- el tratamiento general más temprano del movimiento tridimensional de un cuerpo rígido en respuesta a un momento de rotación aplicado (conduciendo a los famosos ángulos de Euler, más tarde modificados por Krylov para una descripción más fácil de los movimientos de un buque teniendo en cuenta el hecho que el balance puede tener más grandes valores que los otros movimientos);
- el empuje de Arquímedes como integral de presiones sobre la superficie mojada del cuerpo flotante.

## 2.2 El viaje de Bouguer a Perú y el desarrollo de la noción de metacentro

En 1735 la Marina Francesa y la Academia de Ciencias enviaron una expedición a Perú para ayudar verificar la verdadera forma de la Tierra [2,3]. Se sabía que la Tierra no era una esfera perfecta; pero los científicos no conocían si fuera un elipsoide alargado o aplanado en los polos. Más allá de la importancia práctica por la navegación, el problema también asumió un papel "de honor" porque la teoría de la gravitación de Newton, que llevaba a un esferoide alargado, fue opuesta a la teoría de los remolinos de Descartes, que llevaba en cambio a un esferoide chato. Por la expedición de 10 años, el astrónomo Pierre Bouguer y sus colegas marcharon en arriba y en abajo por las Andes para medir la longitud de un grado de latitud en el Virreynato de Perú en proximidad del equador<sup>2</sup>. Durante esto tiempo, Bouguer ideó y escribió su revolucionario texto "Traité du navire" el primer libro de arquitectura naval que pone las reglas científicas del proyecto del buque, incluyendo el metacentro como una medida de su estabilidad.

En la dedicación del texto (Fig. 1) al Señor el Conde de Maurepas, Ministro y Secretario de Estado para la Marina, Bouguer dicho: "*Monseigneur, la protection dont vous honorez les Savants, vous donne de vrais droits sur tous leurs ouvrages, et leur impose en même tems la loi de s'appliquer à les rendre dignes de vous être présentés. Le Public en recueille le fruit; et sçait combien il en est redevable à la faveur de un Ministre déclaré, qui au milieu des guerres dont l'Europe est agitée, n'a cessé d'animer les Sciences par ses regards, et d'en hâter les progrès par ces Entreprises fameuses, qui seront des monuments éternels de la sagesse de ses vûës, et qui seront l'admiration de la postérité.*

*Vous avez voulu, Monsigneur, que j'eusse quelque part à la Commission honorable d'exécuter, sous l'Equateur, une petite partie de ces vastes projets. Pendant qu'au Pérou, je me livrois à cette occupation, en ne négligeant rien pour remplir vos ordres, j'ai profité de tous les moments don il m'a été permis de disposer, pour travailler à la composition de ce Traité sur la Construction de Vaisseaux et la Théorie de leur Manœuvre. Le désir que j'avois de vous l'offrir, m'a soutenu contre les difficultés extrêmes, qui venoient tant de la nature du sujet très compliqué lui-même, que de la situation où je me trouvois alors ; et à peine le Livre fut-il achevé, que j'eus l'honneur de vous écrire, pour vous supplier d'agrèer qu'il parût sous vos auspices. La consécration vous en été faite, Monsigneur, d'une des extrémités de la Terre ; puisse cette circonstance donner quelque mérite a mon hommage! Ci cette essai de mon zèle, pour perfectionner la Navigation, n'a pas tous le succès que j'en attens, il me procure au moins une occasion qui m'est infiniment précieuse, de rendre publique la juste et vive reconnoissance que je ressens pour tous les bienfaits dont vous m'avez comblé. Je suis avec un profond respect, Monsigneur, Votre très-humble et très-obéissant serviteur, Bouguer.*"

A la expedición participaron también dos oficiales de la Armada Española: Jorge Juan (y Santacilia) y Antonio de Ulloa. A la vuelta, Jorge Juan escribió también un libro, sin embargo muy importante aunque de difícil lectura a causa del nivel matemático, publicado en 1771 (25 años después del libro de Bouguer). En el segundo volumen de su *Examen*

---

<sup>2</sup> Contemporaneamente una otra expedición mediva la longitud de un grado de latitud en proximidad del Polo Norte.

*marítimo teórico-práctico, o tratado de mecánica aplicado a la construcción, conocimiento y manejo de los navios y demas embarcaciones*, Jorge Juan expone la teoría de la estabilidad del buque. Se podría pensar que entre Jorge Juan y Bouguer hayan habido alguna colaboración en el desarrollo de la teoría del buque en el curso de la expedición en Perú. La fuerte diferencia de edad (Bouguer estuvo en la plena madurez, habiendo nacido en 1698, mientras Jorge Juan fue algo más que veinteañero, habiendo nacido en 1713) y las condiciones ambientales y de trabajo extremadamente difícil pero hacen pensar como sumamente improbable esta posibilidad.

### 3 De la estabilidad “estática” a la estabilidad “dinámica”

El término energía (*ἔνεργια*), aunque introducido por Aristóteles en el sentido de acción eficaz, ha sido usado en sentido moderno por la primera vez por Keplero al principio del 1600. La formulación correcta de los términos energía potencial y energía cinética (*vis viva*), tuvieron pero que esperar la primera revolución industrial y es atada a los nombres de Mme du Châtelet, Young, Coriolis y Rankine. El reverendo Moseley, sin embargo, anticipaba los tiempos ya introduciendo el concepto de *estabilidad dinámica* en el 1850 en su memoria "On the Dynamical Stability and on the Oscillations of Floating Bodies" [4]:

*Whence it follows that the work necessary to incline a floating body through any given angle is equal to that necessary to raise it bodily through a height equal to the difference of the vertical displacements of its centre of gravity and of that of its immersed part, so that other things being the same, that ship is the most stable the product of whose weight by this difference is the greatest.*

El término dinámica, por cuánto de fundamental importancia en la continuación, no debe ser sobrestimado. Se trata, en efecto, del trabajo hecho en la inclinación transversal de un buque que, partiendo de la posición derecha con velocidad nula y llegando a una inclinación final isocarenica con velocidad también nula, se transforma integralmente en energía potencial por el principio de conservación de la energía (sin considerar las causas disipativas).

Como es conocido, el conocimiento del momento adrizante permite de calcular la *escora de equilibrio* con respecto a un momento esorante asíñado, mientras que la estabilidad dinámica permite de calcular la *máxima escora* consiguiente a la aplicación del mismo momento esorante. Se trata en todo caso, de momentos esorante y adrizante dependientes del ángulo, *pero no del tiempo*.

Con la introducción de los barcos a casco metálico, primero entre todos el Great Eastern en el 1858, la necesidad de enfoques más sistemáticos y de carácter práctico a la estabilidad creció notablemente. Fue el inglés Reed, chief constructor del Royal Navy, a realizar por primero la conexión entre francobordo y estabilidad a grandes ángulos. Sus intuiciones fueron confirmadas en el trágico accidente hecho falta al buque HMS Captain, proyectada con francobordo libre reducido por el Coles, con respecto del buque HMS Monarch de él proyectado. Era el 1870.

#### 4. Las bases por el Criterio General de Estabilidad

El Rahola, en su tesis de doctorado publicada en el 1939 [5], efectuó un análisis discriminatorio sobre un grupo de barcos que sufrieron accidentes conexos con escasa estabilidad o que no sufrieron ningún accidente. Después de haber identificado los parámetros significativos en términos de estabilidad inicial y las características de la curva de los brazos de estabilidad estática y dinámica (curva de las áreas), Rahola desarrolló estándares mínimos relativos a estos parámetros que un buque habría debido tener para no incurrir en aquellos accidentes (vease por ejemplo la Fig. 2). Ésta ha sido la base por el desarrollo en sede IM(C)O del Criterio General de Estabilidad, como recomendación contenida en la Res. A. 167 del 1968.

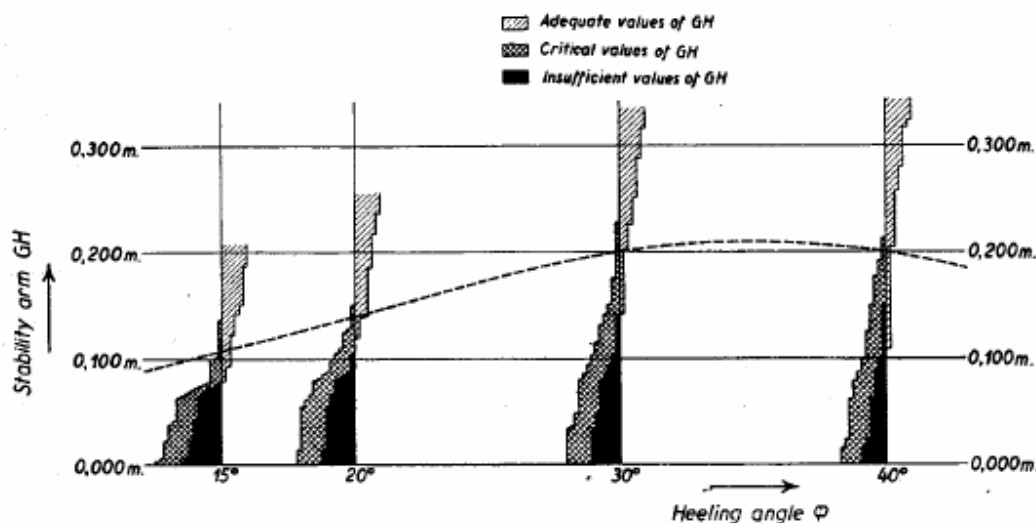


Fig. 2. Requisitos mínimos por la curva de los brazos de estabilidad estática resultantes del análisis discriminatorio entre buques que tuvieron accidentes conexos con insuficiente estabilidad y buques que no sufrieron accidentes [3]. En el diagrama, GH representa el brazo de estabilidad estática (hoy GZ).

#### 5. Las bases por el Criterio de viento y balance intensos (criterio meteorológico)

El Rev. Moseley, como señalado en el § 3, puso en el 1850 las bases por el empleo del balance energético cuál método para calcular la máxima escora bajo la acción de una causa escorante que a los ángulos menores del ángulo de equilibrio estático exceda de una cantidad finida el momento adrizante. En el 1935 el Pierrottet [6] (sin citar el Moseley ni ningún otro) utilizó el método del balance energético sobre la base del que presentó un criterio de estabilidad de los buques que, directamente o indirectamente, influyó algunas décadas más tarde en gran medida el desarrollo de los criterios de estabilidad. El criterio consideró el efecto de olas y viento, la aglomeración de pasajeros en una banda, el ángulo de escora debido a una maniobra de giro y la estabilidad en inundación. Es sin embargo de gran interés de leer los comentarios de Sir Archibald Denny, Chairman de la Sesión de la

Institution of Naval Architects de Londres:

The CHAIRMAN: I do not wish in the least to detract from the good work that Professor Pierrottet has done. I think the Paper will be very useful to us, but I do hope it will be a long time before it is made the basis for new Board of Trade regulations by the Classification Societies. The number of losses from capsizing is so exceedingly small, even more tiny than he says, that it would be a very stiff thing to impose these regulations. After all, when you had imposed them, the skipper might upset them all by his loading of the ship. There is the difficulty.

I hope Professor Pierrottet will not assume that I am pouring too much cold water on his scheme, for I think you will agree with me that he has devoted his energy, brains, and ability to producing an interesting and, I believe, a useful Paper, and that we ought to accord him a very hearty vote of thanks.

y la respuesta del Pierrottet:

To Sir Archibald Denny I would say that I think the problem of stability is rather neglected by ship designers. I can see danger in his recommendation of empirical, rather than scientific, methods. If the proportions of bridges across rivers were decided empirically, I am sure that sooner or later there would be many a disaster. The limits of the field over which empirical methods can safely be applied are very vague. It is my opinion, therefore, that no effort should be spared to study scientifically the stability of ships, and to ensure that designers do not neglect its consideration. I am rather doubtful, moreover, if this object can be attained without the application of binding regulations. I quite agree that at 50° inclination nothing would remain still on deck, but that is not the problem: when a ship is unfortunate enough to acquire a list of 50°, the problem is not so much of how to keep all the passengers safely on board, but rather to prevent her from capsizing. I should not be averse, though, to reducing the proposed 50° to some smaller figure.

Se trata también hoy de un debate de gran actualidad. En particular por cuánto atañe la presunta dificultad de aplicación de los criterios conectada, una vez, con las efectivas dificultades de cálculo, hoy con la grande variedad y nivel de las oficinas de proyecto, de los astilleros y de los operadores marítimos. A menudo ocurre de sentir que los criterios de estabilidad son *demasiado poco científicos de parte de los científicos y demasiado complejos de parte de los operadores* [7].

A partir del criterio propuesto por el Pierrottet, los Japoneses, en consecuencia del vuelco del barco Toya Maru en el 1954, desarrollaron en los años '50 un Criterio Meteorológico [8] que fue, por la época, un estándar de empujado nivel y constituyó la base de lo que será el Criterio Meteorológico de la OMI<sup>3</sup>, Recomendación contenida en la Res. A.562 del 1985, por los buques de carga y pasajeros de 24 m de largo y más. Anteriormente, una versión ínterin del Criterio Meteorológico fue incluido en la primera Convención de Torremolinos del 1975 por los buques pesqueros de 45 metros de largo y más.

## **6. Hacia una verdadera "dinámica": el movimiento de balanceo y el fenómeno de la resonancia**

Las acciones del mar y el viento a ráfagas, dependen del tiempo y por lo tanto no se puede

---

<sup>3</sup> La Organización Marítima Internacional (OMI, en inglés IMO) es un organismo especializado de las Naciones Unidas que promueve la cooperación entre Estados y la industria de transporte para mejorar la seguridad marítima y para prevenir la contaminación marina.

aplicar el principio de conservación de la energía. Necesita en este caso considerar el fenómeno de la resonancia. En condiciones estacionarias, la amplitud de la oscilación es dada por el balance energético entre el momento escorante y las causas que producen disipación. Por la estabilidad del buque son de gran interés los dos casos correspondientes a mar de través y a mar longitudinal.

### 6.1 Las generalizaciones del Principio de Arquímedes

El principio de Arquímedes puede ser sacado de la observación simple aún revolucionaria que un cuerpo *flota* en agua (o al menos tiene un *peso reducido*), aunque sujeto a su peso debido a la gravedad, debido a una fuerza ascendente, a saber la flotabilidad o *empuje*, proporcional a la masa desplazada de agua. Hay, sin embargo, una diferencia importante en las características de las dos fuerzas, el peso del cuerpo y el empuje: el primero es una fuerza que actúa sobre el centro de masa del cuerpo, mientras que el empuje observado es el resultado de las fuerzas de presión ejercidas sobre la superficie mojada del cuerpo, que actúa por el centro imaginario de la masa desplazada de agua, es a dir por el centro del volumen sumergido del cuerpo, llamado el *centro de carena*. Interpretando la validez del principio de Arquímedes en esta forma, los complicados integrales de superficie de las fuerzas de presión son substituidos por los cálculos más convenientes de volúmenes y centros de volúmenes (un ejemplo notable de aplicación del teorema de Gauss a la *Geometría del buque*).

Una modificación importante del principio de Arquímedes es relacionada con la flotabilidad en un líquido en movimiento bajo el efecto de alguna perturbación externa: típico es el caso de un cuerpo que flota en presencia de olas como más o menos inevitablemente pasa a barcos reales. Esta generalización no permite usar los simples cálculos del volúmenes y centro del volumen de carena, porque las presiones instantáneas sobre el cuerpo (que incluyen los efectos hidrodinámicos) no pueden fácilmente ser expresadas matemáticamente, así una integración de presión exacta sobre la superficie mojada es en realidad necesaria.

Varias aproximaciones son usadas en la práctica para resolver este problema complicado: típicamente, la acción resultante (fuerza y su momento) es calculada asumiendo una descomposición de la presión total que actúa sobre la superficie mojada en una parte principal o *componente de Froude-Krylov* que consiste en la presión la ola real habría ejercido sobre el casco del barco si la ola no hubiera sido alterada por la presencia del barco (teoría del *buque fantasma*), y en otras partes que se refieren a la perturbación producida a la ola por el barco parado (componente de *difracción*) y según los movimientos del barco (componente de *radiación*). En los típicos approches modernos a los movimientos del buque en olas, estos componentes son ulteriormente descompuestos y reorganizados para dar la masa (hidrodinámica) arrastrada, el amortiguamiento hidrodinámico, la fuerza restauradora y la fuerza debida a las olas (excitación) en las ecuaciones de movimiento obtenidas aplicando la dinámica newtoniana al buque.

### 6.2 El caso del mar de través - Aspectos no lineales

Ya Froude entre el 1860 y el 1880 destacó muchos aspectos del balanceo sobre olas, considerando principalmente el caso de mar de través. Se trata de considerar la solución de la ecuación diferencial del movimiento de balanceo, eventualmente unida al menos con los otros movimientos laterales si la hipótesis de eje de rotación fijo no es aceptable. Se puede adoptar una descripción en ángulo absoluto o en ángulo relativo, esta última recobrando una función relevante después de un largo período de olvido debido a la dificultad de efectuar cálculos en ángulo relativo con mar irregular o en todo caso con composición armónica.

Las diferentes contribuciones hidrostáticas y hidrodinámicas de esta ecuación no son todavía de fácil cálculo a causa de las grandes amplitudes generalmente alcanzables de este movimiento en presencia de olas de intensidad moderada. No entraremos en esta memoria en el mérito de estas cuestiones, recordando solamente que el cálculo de los coeficientes de amortiguamiento todavía constituye un problema abierto.

Complicaciones importantes son constituidas por el estudio de las fases transitorias, de los aspectos estocásticos, de los aspectos no lineales y de la combinación de estos últimos dos.

Por cuánto concierne los aspectos no lineales, observamos que, aunque las ecuaciones diferenciales ya hayan sido introducidas por Leibniz y Newton, el estudio de los aspectos no lineales sólo es iniciado con Poincaré al final del 1800 y la mecánica no lineal ha sido desarrollada solamente a partir de los años '70 del siglo pasado.

La aplicación de estos conceptos al balanceo no lineal en mar regular al través, descrita por ejemplo a través de una ecuación diferencial que incluye términos no lineales sea en el amortiguamiento que en el momento adrizante, ha permitido de identificar condiciones de resonancia diferentes del caso convencional del sincronismo [9]. Se trata de las asillamadas resonancias ultrarmonica y subarmónica (Fig. 3).

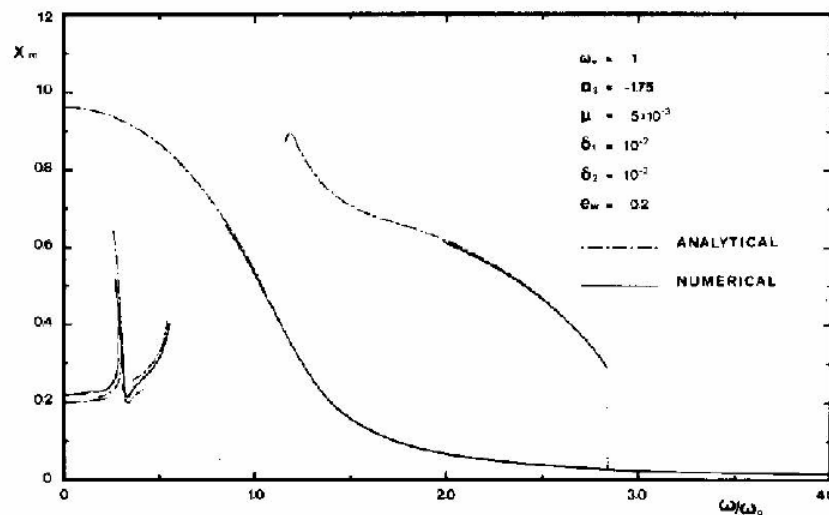


Fig. 3. Amplitud de balanceo estacionario en función de la frecuencia por un buque en mar regular al través. Resultados conseguidos a través de aplicación de un método perturbativo aproximado a la ecuación diferencial no lineal de balanceo y comparación con los resultados conseguidos por vía numérica [9].

De estos aspectos, de los que se ha provisto evidencia experimental [10] de existencia y peligrosidad (Fig. 4 y Fig. 5), necesita tener cuenta cuando se proyectan sistemas fuertemente no lineales y cuando se evalúan los parámetros de tal sistema a partir de pruebas experimentales por un procedimientos de identificación paramétrica.

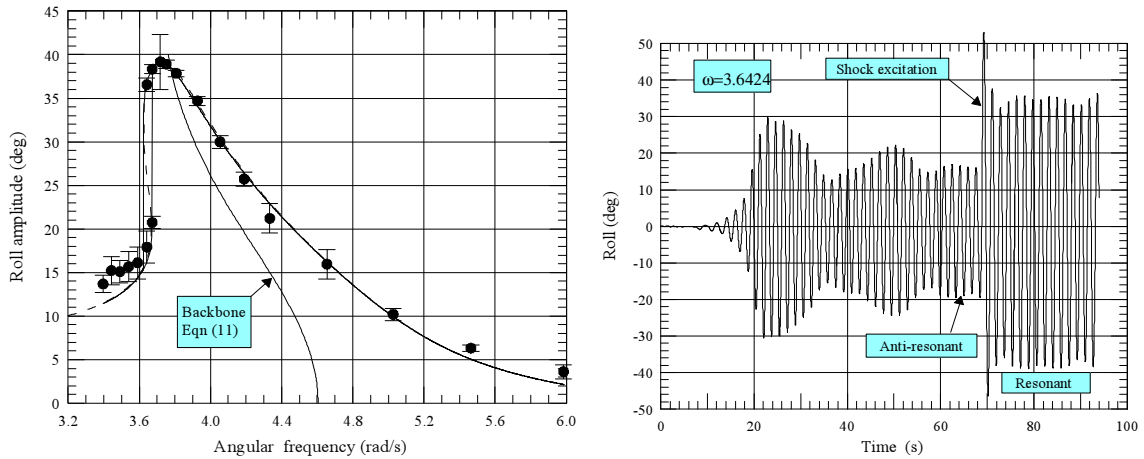


Fig. 4. a) Amplitud estacionaria de balanceo en mar regular al través. Los puntos indican los resultados de pruebas experimentales. b) Historia temporal de una prueba experimental con salto de amplitud en presencia de una bifurcación de la ecuación del movimiento [10].

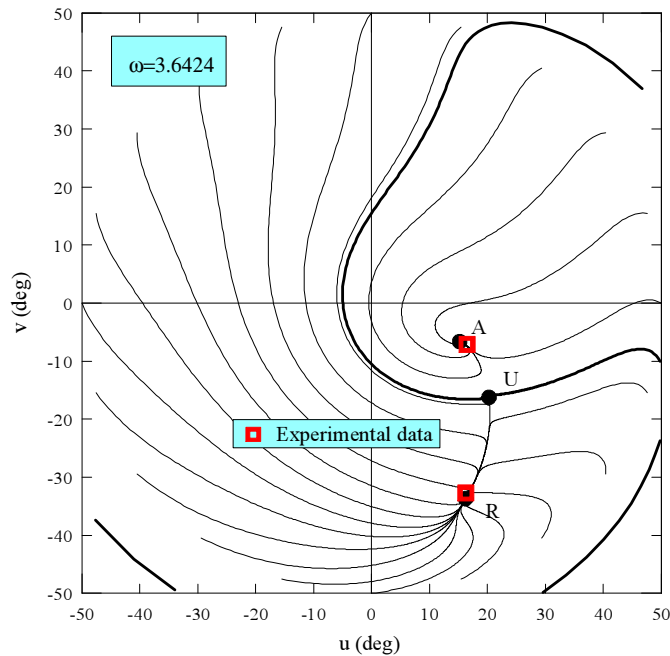


Fig. 5. Dominios de atracción de las soluciones de la ecuación del movimiento de balanceo de que a la historia temporal de la figura anterior [10].

### 6.3 El caso del mar longitudinal - Resonancia paramétrica

Grim, Kerwin y Paulling discutieron el problema de la estabilidad en mar longitudinal, (predominantemente de popa o de aleta) de un buque habiente la posición recta de equilibrio estable ( $\overline{GM} > 0$ ) en mar calmo encontrando que ella pudiera ser descrita por una ecuación diferencial del tipo de Mathieu

El efecto de la ola longitudinal, combinado con los movimientos del buque produce una gran variación de la forma de carena y en particular de la forma y extensión de la figura de flotación (Fig. 6). Se tiene como resultado una variación periódica de la altura metacéntrica (Fig. 7) y del brazo de estabilidad a los grandes ángulos.



Fig. 6. Variación de la figura de flotación consiguiente al paso de una ola, en condiciones isocarenicas, habiente  $\lambda = L_{pp}$  e  $s_w = 1/30$  [11].

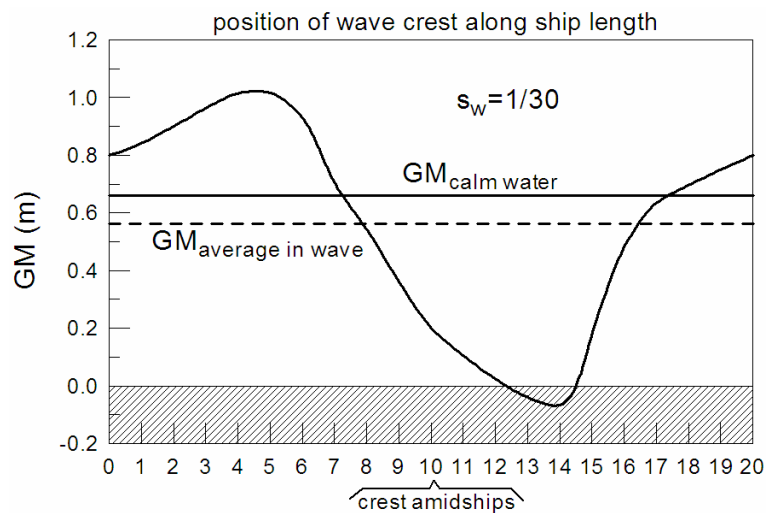


Fig. 7. Variación del valor promedio de la altura metacéntrica con respecto al caso del mar calmo y de la altura metacéntrica en función de la posición de la ola sobre la eslora del buque en las mismas condiciones de la Fig. 6 [11].

Aunque la función  $\overline{GM}(t)$  pueda tener un curso complicado, las características principales pueden ser representadas por los primeros términos de la serie de Fourier. Sólo considerando el primer término, de amplitud  $\delta\overline{GM}$ , se tiene:

$$\overline{GM}(t) = \overline{GM}^* \cdot \left( 1 + \frac{\delta\overline{GM}}{\overline{GM}^*} \cdot \cos \omega_e \cdot t \right)$$

y por consiguiente la ecuación del movimiento de balanceo se vuelve:

$$\ddot{\phi} + 2 \cdot \mu \cdot \dot{\phi} + \omega_0^{*2} \left( 1 + \frac{\delta\overline{GM}}{\overline{GM}^*} \cdot \cos \omega_e \cdot t \right) \cdot \phi = 0$$

Una ecuación de este tipo, confrontada con aquella típica de mar al través, presenta las siguientes diferencias:

- ausencia de una fuerza exterior explícita a causa de la simetría del barco con respecto de la ola longitudinal (en presencia de olas de direcciones diferentes se tiene también aquí una fuerza explícita);
- presencia de un término, el momento adrizante, explícitamente dependiente del tiempo.

Este término aparece como una modulación de la frecuencia natural  $\omega_0$  o, alternativamente, como una fuerza exterior de tipo paramétrico.

Aunque sea lineal, la resolución de la ecuación de Mathieu, introducida en el 1868 en conexión con el problema de las vibraciones de una membrana elíptica, presenta grandes dificultades y preve comportamientos nuevos con respecto de la ausencia de términos habientes una dependencia periódica del tiempo. En particular, ella preve que se pueda perder la estabilidad de la posición recta, que queda siempre sin embargo posición de equilibrio. En presencia de perturbaciones también de pequeña entidad se puede haber entonces la aparición de un movimiento de balanceo, dicho precisamente balanceo paramétrico, que puede alcanzar rápidamente amplitudes peligrosas por la seguridad del buque o el cargo transportado. Las condiciones de umbral por la manifestación del balanceo paramétrico son las siguientes [12]:

$$\begin{cases} \omega_e \cong 2 \cdot \omega_0 \\ \frac{\delta\overline{GM}}{\overline{GM}^*} > 4 \cdot \frac{\mu}{\omega_0} \end{cases}$$

Qué muestran como el balanceo paramétrico sea subarmónico de orden dos con respecto a la fuerza (el término dependiente del tiempo). El enfoque lineal, siendo limitado a pequeñas amplitudes de movimiento, es útil para la previsión del umbral, pero no permite de valorar la amplitud del balanceo sobre umbral. La limitación superior es provista del efecto de los términos de amortiguamiento no lineal [13], que disipan la energía provista por la fuerza, o de los términos no lineales del momento adrizante que contribuyen desplazando

progresivamente la frecuencia natural de la condición de resonancia con un mecanismo análogo a aquel de la Fig. 3.

Una vez comenzado, el balanceo paramétrico puede presentar un transitorio muy rápido y alcanzar amplitudes peligrosas, como por ejemplo en Fig. 8, que muestra los resultados experimentales relativos a pruebas sobre modelo en mar regular de proa con pendiente  $s_w = 1/30$ . La situación es más compleja en presencia de mar irregular y fuerte no linealidad [14]. En aproche no lineal pueden averiguarse muchas condiciones, todas averiguadas experimentalmente [15], además de la inestabilidad de la posición recta:

- coexistencia de la estabilidad de la posición recta con una solución de balanceo paramétrico estable, fuera de la zona de frecuencia típica de la inestabilidad de la posición recta;
- coexistencia de dos soluciones no nulas, ambas estables, en presencia de inestabilidad de la posición recta;
- otros casos más complejos...

El riesgo de balanceo paramétrico puede ser reducido durante el proyecto aumentándolo el amortiguamiento, reduciendo las variaciones de altura metacéntrica sobre ola, reduciendo el flare, o instalando tanques líquidos estabilizadores. Del punto de vista operativo, puede ser mitigado evitando la condición de resonancia paramétrica interviniendo sobre la condición de carga o con indicaciones al Comandante.

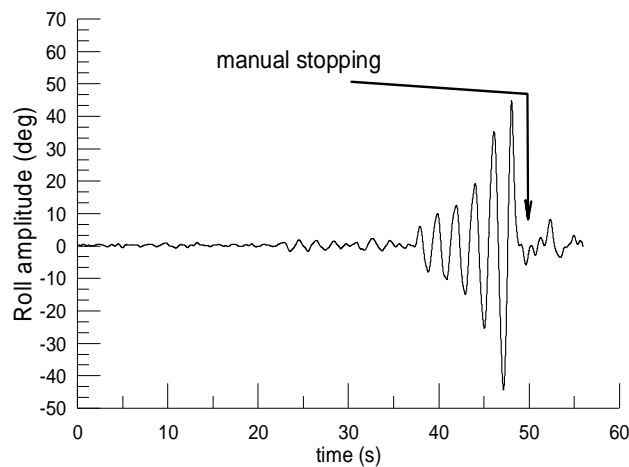


Fig. 8. Historia temporal del balanceo paramétrico en mar regular de proa habiente  $\lambda = L_{pp}$  e  $s_w = 1/30$  [12].

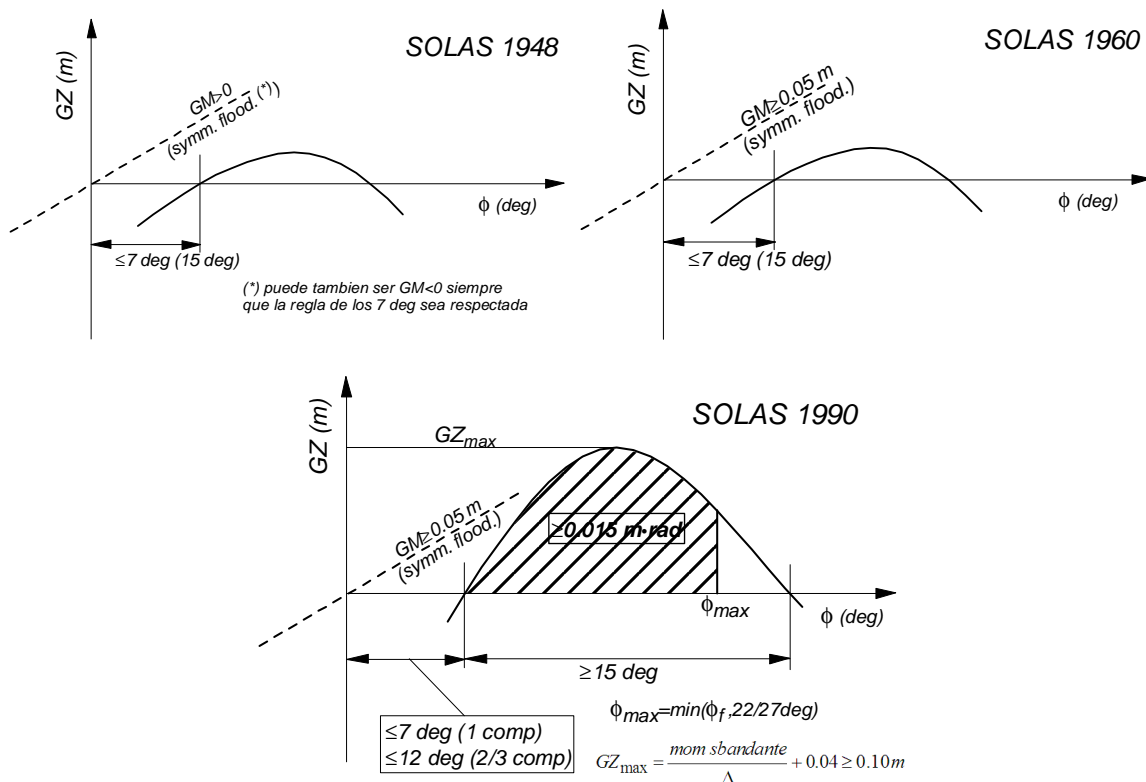
Aunque siendo el balanceo paramétrico un fenómeno conocido desde mucho tiempo, escaso interés fue dedicado al caso de mar de proa hasta el accidente que ocurrió al buque portacontenedores APL China en 1998. En consecuencia de este accidente, y de los estudios conexos, ha sido efectuada la revisión de la circular 707 del 1995 "Guidance to the máster for avoiding dangerous situations en following and quartering seas"<sup>4</sup> del Comité de

<sup>4</sup> Orientación que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas con mar de popa o de aleta

Seguridad Marítima de la OMI y el argumento balanceo paramétrico ha sido insertado a lleno título entre los fenómenos que tienen que ser incluidos en los Criterios de Estabilidad de la segunda generación, vease parrafo 9.3).

## 7. La estabilidad en inundación

Como es conocido, el desarrollo de las primeras normativas internacionales de compartimentado ha tenido principio en consecuencia del hundimiento del Titanic en 1912 en el curso de su viaje inaugural. Este trágico evento movilizó la opinión pública internacional y dio origen a la primera, de una larga serie, reunión en el ámbito de la Convención SOLAS<sup>5</sup> en 1914. Debe notarse que, aunque las líneas básicas del método de compartimentado dicho del *Criterio de Servicio*, basado sobre los conceptos de eslorar inundables, esloras admisibles y Factor de subdivisión, fueran puestas ya en el curso de la primera reunión, para tener la primera normativa de estabilidad en inundación hace falta esperar el 1948 y la OCMI (*Organización Consultiva Marítima Internacional*). La primera regla de estabilidad en inundación, indicada en Fig. 9, solicitando que la estabilidad inicial fuera no negativa en inundación simétrica, demuestra cuanto poco todavía fuera considerado el compartimentado en aquellos años. Debe notarse que el Pierrottet ya incluyó la estabilidad en inundación en su propuesta del 1935...



<sup>5</sup> SOLAS es el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar.

Fig. 9. Evolución de los requisitos de estabilidad en inundación por la normativa SOLAS basada en el Criterio de Servicio ([16] - por exigencias de espacio han sido descuidados los transitorios de inundación).

Siempre en la Fig. 9 es representada la evolución de la normativa de estabilidad en inundación hasta las modificaciones introducidas por SOLAS'90 a los buques de pasajeros, modificaciones que han señalado el punto más alto (y también el último!) del método determinístico del criterio de servicio. Ya en 1974, en efecto, fue iniciado el recorrido que llevará en el 2009 a la formulación de la normativa *armonizada* de compartimentado sobre base probabilística conocida como SOLAS'2009. No es tarea de esta breve memoria de entrar en el detalle de esta nueva normativa [16].

## 8. Actitud re-activa y actitud pro-activa

Tenemos que recordar que la evolución de las normativas de compartimentado y estabilidad en inundación, como las de estabilidad sin avería ha sido constelada de accidentes graves en consecuencia de los cuales las normativas fueron cambiadas. De este punto de vista, revistieron gran importancia los estudios conducidos sobre los accidentes para sacar de ellos todas las posibles enseñanzas por el futuro, sea en términos proyectuales que de conducta operativa.

En los últimos años todavía se ha tenido un aumento del conocimiento de los mecanismos peligrosos y un fuerte desarrollo de las metodologías teórico-numéricas por la simulación de los movimientos en condiciones extremas gracias al empuje dado por los Congresos y Workshop sobre la Estabilidad, que se desarrollan con cadencia anual y grande participación, y a la institución de parte del ITTC (*Conferencia Internacional de Canales de Ensayo*) de un Comité Especializado "Stability en Waves." Como resultado, la actitud re-activa ha sido abandonada en favor de una actitud pro-activa al principio de la discusión relativa a los criterios de estabilidad del buque sin avería de la segunda generación.

Aunque la discusión a la OMI aya en fin llevado a excluir, al menos inicialmente, la adopción integral de un enfoque tipo *Formal Safety Assessment*, el paso sobre indicado representa en todo caso el paso entre las dos actitudes contrapuestas que están a la base (Step1) de aquel enfoque:

**What did go wrong? → What might go wrong?<sup>6</sup>**

## 9. El desarrollo de los criterios de estabilidad a buque sin avería

Por conveniencia de presentación, esta parte será subdividida en tres periodos:

- de la fase inicial del desarrollo de Criterios de Estabilidad a nivel internacional, groseramente el principio de los años '60, hasta el cumplimiento del Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI, recomendación contenida en la Res. A.749 y su, lenta, evolución hasta el 2001;

---

<sup>6</sup> ¿qué ha ido mal? → ¿qué podría ir mal?

El desarrollo de los criterios de Estabilidad del Buque a la luz de los progresos de la Arquitectura Naval

- del principio de la reestructuración Código de Estabilidad para todos buques cubiertos por los instrumentos de la OMI al final de este proceso en 2007;
- del principio del desarrollo de los criterios de la segunda generación (PBC - Performance Based Criteria<sup>7</sup>) a hoy, incluidos los previsibles desarrollos futuros.

#### 9.1 Primera parte: Los criterios de estabilidad de la primera generación - *Al comienzo fue la supervivencia en inundación*

Como hemos visto, las normativas de estabilidad, sea a buque sin avería que en inundación, sólo han sido formuladas recientemente, a un estadio muy avanzado de desarrollo de la Arquitectura Naval [17,18]. Éste es particularmente verdadero para las normativas formuladas a nivel internacional que han sido formuladas mucho tiempo después la misma institución de la O(C)MI. Las primeras de ellas han nacido, en efecto, de una recomendación contenida en las conclusiones de la Conferencia de 1960 de la Convención SOLAS:

“The Conference, having considered proposals made by certain governments to adopt as part of the present Convention regulations for intact stability, concluded that further study should be given to these proposals and to any other relevant material which may be submitted by international Governments. The Conference therefore recommends that the Organization should, at a convenient opportunity, initiate studies on the basis of the information referred to above, of:

- a) intact stability of passenger ships;
- b) intact stability of cargo ships;
- c) intact stability of fishing vessels, and
- d) standards of stability information.”<sup>8</sup>

Cómo resultado de estos estudios el *Criterio General* o "Estadístico" ha sido formulado y adoptado en 1968 (Res. A.167 de la OMI). El contiene estándares mínimos por la altura metacéntrica inicial y algunas características de la curva de los brazos de estabilidad estática y las áreas subtendidas (estabilidad dinámica). Por los buques de pasaje también son previstos estándares de estabilidad rigurosa la escora debida a una maniobra de giro y la aglomeración de pasajeros en una banda<sup>9</sup>.

---

<sup>7</sup> Criterios basados sobre las prestaciones (del buque en las diferentes condiciones meteo-marinas).

<sup>8</sup> La Conferencia, considerando las propuestas hechas por algunos gobiernos de adoptar como parte de las regulaciones de la presente Convención regulaciones sobre la estabilidad del buque sin avería, concluyó que estas ofertas y a cualquier otro material relevante que puede ser sometido por Gobiernos internacionales deberían ser objeto de un estudio ulterior. La Conferencia por lo tanto recomienda que la Organización, en una oportunidad conveniente, inicie estudios sobre la base de la información sobre referida, de :

- a) estabilidad de buques de pasajeros sin avería;
- b) estabilidad de buques de carga sin avería;
- c) estabilidad de buques pesqueros sin avería,
- d) estándares de información sobre estabilidad.

<sup>9</sup> Puede ser interesante observar que, con la mejoría de las condiciones de vida, también el peso de las personas es cambiado. Por consiguiente, en la normativa original se consideró que "Si supondrá un masa de 75 kg por pasajero con la excepción que este valor puede ser reducido a un valor no inferior de 60 kg cuando éste pueda ser justificado.", mientras hoy la norma recita: "Si supondrá un masa mínima de 75 kg por pasajero, él bien si permitirá aumentar este valor, a reserva de que el apruebe el Administración."

En paralelo fue conducida la actividad finalizada a la formulación de criterios de estabilidad adecuada a los buques pesqueros. Éste condujo a la Res. A.168 de la OMI y a la Convención de Torremolinos del 1975. Por una panorámica sobre el estado actual y los previsibles desarrollos futuros de la normativa por los buques pesqueros, vease [19].

Debe ser notado que los 6 sub-criterios de los que se compone el Criterio General no tienen en general todos igual dificultad en la aplicación práctica. La aplicación de el relativo a la posición del máximo de la curva de los brazos de estabilidad, en efecto, encontró dificultades desde el principio. Ésta ha llevado a la ambigua formulación (la cursiva es mía):

“The maximum righting arm should occur at an angle of heel *preferably exceeding 30° but not less than 25°*”.

En vista de la tendencia actual que ve un progresivo aumento de la relación B(D)/T por algunas tipologías de buques y haciendo referencia a las reglas anteriormente adoptadas por muchos Registros, en la redacción de las Notas Explicativas al nuevo Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008 se ha decidido por fin aceptar, sujeto a la aprobación de la Administración, una reducción del ángulo de lo máximo hasta 15° con un incremento en el área 0°÷30° como previsto por el Código por los Offshore Supply Vessels (*Buques de suministro mar adentro*).

De nuevo en las conclusiones, la SOLAS 1974 indicó:

“[IMO] recommends that steps be taken to formulate improved international standards on intact stability of ships taking into account, inter alia, external forces affecting ships in a seaway which may lead to capsizing or to unacceptable angles of heel.”<sup>10</sup>

Como resultado, el *Criterio Meteorológico* (Criterio de viento y balance intensos) fue adoptado por la OMI en 1985 (Res. A. 562). En realidad, ello consta de un Criterio del Viento, cuya formulación ha sido devuelta menos ambigua en el Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008, y de un Criterio de Viento y Olas. En este último, el ángulo de balanceo estacionario  $\phi_1$  bajo la acción de las olas es calculado con la (mucho criticada) fórmula:

$$\phi_1 = 109 \cdot k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot s}$$

qui representa la amplitud de la solución estacionaria de la siguiente ecuación diferencial del movimiento (no lineal en el sólo amortiguamiento):

$$\ddot{\phi} + \beta \cdot \dot{\phi} + \omega_0^2 \cdot \phi = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot r \cdot s \cdot \cos(\omega_e \cdot t)$$

Un estudio profundizado del problema ha indicado que todos los parámetros de la fórmula por el cálculo de  $\phi_1$  son valorados por el procedimiento de manera no correcta [20-22]. Se ha además visto que la asunción que el centro de resistencia lateral en el movimiento de

---

<sup>10</sup> " [OMI] recomienda que los pasos necesarios sean tomados para formular normas internacionales sobre la estabilidad sin avería mejoradas de hecho de tener en cuenta, entre otras cosas, de las fuerzas externas que afectan un buque en una ruta marítima y que pueden conducir a la zozobra o a ángulos inaceptables de escora."

deriva bajo la acción del viento sea a mitad inmersión, no es para nada confirmada por los experimentos recientes [23]. Recordamos que esta hipótesis simplificadora, con respecto de las anteriores asunciones sobre el centro de resistencia lateral como centro del plan de deriva, fue expresada por el Pierrottet y pasada igual al Criterio Meteorológico a través del Criterio japonés. También observamos que el criterio se basa en un balance energético, durante la *última media oscilación de balance*, lo que es no correcto, tratándose de acciones dependientes del tiempo. La justificación se basa sobre cuánto dicho anteriormente a propósito de la resonancia.

Los dos criterios de estabilidad así formulados han constituido la base del Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI, contenido en el Res. A.749 y modificaciones siguientes. Junto al MSC Circ. 707, de naturaleza cualitativa e independiente del tipo de buque, han representado un indudable progreso y han contribuido grandemente al aumento de la seguridad en mar. Recordamos que los dos Criterios principales tuvieron que ser aplicados ambos aunque quedando a nivel OMI de "*recomendaciones*".

De un punto de vista general, los dos Criterios son ambos de naturaleza prescriptiva y tienen carácter semiempírico. Mientras el Criterio General es de naturaleza estadística, siendo basado en los resultados del análisis de accidentes, y por tanto sometido a obsolescencia en correspondencia con la variación de las formas y las tipologías, el Criterio Meteorológico contiene un modelado físico, aunque simplificado, y es de tipo *Goal-based*, consistiendo el *goal* en el no superar el ángulo crítico  $\phi_2$ .

## 9.2 Segunda parte: Las modificaciones introducidas con la formulación del Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008

En 2001 es iniciado el proceso de revisión de las Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI. La revisión se hizo necesaria en base a la obsolescencia de las fórmulas incluidas en el Criterio Meteorológico concernientes sea el cálculo de la amplitud de balanceo sea la acción del viento, con particular referencia a los modernos buques de crucero [SLF44/INF.6]. Inicialmente limitado a la revisión del Criterio Meteorológico, el proceso se ha extendido al entero Código con la idea de obrar la revisión de ello de una parte y de formular una nueva generación de Criterios de Estabilidad basada en el comportamiento efectivo del barco en las diferentes condiciones meteo-marinas.

En el ámbito del Subcomité de Estabilidad y Líneas de Carga y de Seguridad de Pesqueros SLF fue formado un "Grupo de trabajo sobre la revisión del Código de Estabilidad sin Avería" con la coordinación del autor de la presente memoria. La primera parte de la actividad fue dedicada a la revisión del Código y a la resolución de algunos problemas urgentes. Esta parte de la actividad se ha concluido en el 2007 con los siguientes resultados principales:

- Reestructuración del Código (Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008 y MSC.1/Circ. 1281) devolviendo al mismo tiempo de ello una parte obligatoria bajo el paraguas representado de SOLAS y de ILLC. Aunque siendo una *recomendación* a nivel de OMI, muchas partes del Código tuvieron todavía carácter obligatorio de hecho.

El desarrollo de los criterios de Estabilidad del Buque a la luz de los progresos de la Arquitectura Naval

Sin embargo su status particular devolvió la posibilidad de algunas alternativas presentes en los reglamentos adoptados por algunas Administraciones, como por ejemplo el ángulo del máximo brazo de estabilidad estática de que se ha hablado en el § 9.1).

- Se ha portanto distinguido la Parte A – Criterios Obligatorios de la Parte B - Criterios recomendados de proyecto para determinados tipos de buques;
- Desarrollo de un procedimiento alternativo por la verificación del Criterio Meteorológico sobre base experimental (MSC.1/Circ. 1200 y 1227). Este procedimiento se ha hecho necesario en vista de la obligatoriedad de la Parte A del Criterio Meteorológico y el hecho que se ha considerado peligroso aportar a este nivel modificaciones al criterio mismo sin validación. El procedimiento alternativo ha sido desarrollado en el ámbito de una colaboración entre Italia y Japón;
- Otras modificaciones menores, que conciernen el efecto de los espejos líquidos, el efecto del trimado, etc.)
- La revisión de la MSC Circ. 707 para producir la MSC.1/Circ.1228. Notese que, dado el poco tiempo a disposición, la nueva circular es también de tipo cualitativo y independiente del buque. Indicaciones específicas al Comandante serán provistas al final de la última parte de la actividad.

### 9.3 Fenómenos no incluidos o no adecuadamente tratados en el Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008

En el curso de la discusión dentro del Grupo de Trabajo, se ha evidenciado como los siguientes fenómenos no fueran incluidos o adecuadamente tratados por los criterios existentes:

- los fallos de estabilidad en la condición de buque apagado;
- los fallos de estabilidad con mar de popa asociados con cuestiones relativas a la variación de estabilidad en las olas, en particular los brazos adrizantes reducidos en un buque situado en la cresta de la ola;
- los fallos de estabilidad ocasionados por la resonancia paramétrica, incluido el examen de cuestiones relacionadas con grandes aceleraciones y esfuerzos sobre la carga y la variación de estabilidad en las olas;
- los fallos de estabilidad ocasionados por la caída al través del buque incluido el examen de cuestiones relacionadas con la maniobrabilidad y la capacidad para mantener el rumbo en la medida en que puedan afectar a la estabilidad;
- los fallos de estabilidad ocasionados por aceleraciones excesivas (SLF53 – Jenero 2011)

### 9.4 Tercera parte: La segunda generación de criterios de estabilidad: Criterios basados sobre las prestaciones

En 2007 el nuevo *Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008* fue adoptado por el Comité de la Seguridad Marítima de la OMI.

Se retomó a este punto a trabajar a la segunda parte del programa consistente en el desarrollo de criterios de estabilidad de la segunda generación [24]. Por consiguiente el siguiente plano de acción fue decidido:

- elaboración de criterios de vulnerabilidad para identificar la posible susceptibilidad de un buque a los fallos de estabilidad parciales (ángulos/aceleraciones excesivos de balance) o totales (zozobra) para cada una de las modalidades;
- elaboración de procedimientos para la evaluación directa (como parte de una alternativa a los criterios publicados) para cada una de las modalidades (vease § 9.3 de la presente memoria);
- elaboración de:
  - prescripciones normalizadas para las orientaciones a bordo;
  - criterios para ciertos tipos de buques;
  - un plan de implantación en el Código de Estabilidad sin Avería 2008 para los criterios de estabilidad sin avería de nueva generación (incluidos los criterios paramétricos (simplificados)).”

La idea de los *Criterios de Vulnerabilidad* es muy importante para mejorar la seguridad de la navegación desarrollando criterios que sean *cost-effective*. Los criterios de estabilidad de la segunda generación son en efecto basados sobre una estructura a más niveles (3+1) y dirigidos a buques que, por formas o dimensiones pueden ser principalmente sensibles a los fenómenos (modos) identificados como potencialmente peligrosos y por los cuales los criterios existentes no provean adecuada cobertura. Estos buques son calificados como *no-convencionales* y el objetivo del primero nivel de los nuevos criterios (*Criterios de Vulnerabilidad de nivel 1*) es justo aquel de determinar si un determinado buque es convencional o no convencional con respecto de aquel particular modo.

Los niveles 1 y 2 de los criterios de vulnerabilidad se elaborarán con el objetivo de evaluar los fallos de estabilidad no contemplados por los criterios actuales y de justificar la aplicación de la evaluación directa de la estabilidad. Al suponer que la evaluación directa de la estabilidad presenta un nivel de complejidad más alto, cabe prever que se aplique sólo a los buques considerados vulnerables para una modalidad de fallo concreta (tal como se determine mediante el nivel 2 de los criterios de vulnerabilidad). La norma para los criterios de vulnerabilidad de nivel 2 se elegirá para justificar de manera suficiente la aplicación de la evaluación directa de la estabilidad.

Si un barco pasa el primer nivel, significa que no es susceptible con respecto de aquel modo y va sometida al Código de Estabilidad sin Avería 2008, si aplicable. Si no pasa el primer nivel, éste significa que aquel barco es no-convencional con respecto de aquel particular modo y por lo tanto puede ser vulnerable. A este punto, el buque debería estar sometido a verificación completa (*Evaluación directa de la estabilidad o DSA - direct stability assessment*) con respecto de aquel modo. Este paso será previsiblemente muy oneroso, por cuyo se ha previsto uno según nivel de verificación (*Criterios de Vulnerabilidad de nivel 2*) con el objetivo de confirmar la vulnerabilidad a aquel modo. Si el barco no pasa el nivel 2, hace falta pasar al nivel 3, es decir al DSA, (efectuado con metodologías performance-based), de otro modo el barco está sometido al Código de Estabilidad sin Avería 2008, si aplicable.

Los resultados conseguidos con el DSA podrán ser utilizados para disminuir la vulnerabilidad a aquel particular modo por modificaciones proyectuales y/o indicaciones operativas (nivel 3+1) que puedan asistir al Comandante a reducir al mínimo posible el nivel de riesgo. Los resultados de la aplicación del DSA además proveerán informaciones sobre el nivel de seguridad conexas.

En el curso de la reunión del SLF52 han sido dadas las siguientes especificaciones de principio por los criterios de los diferentes niveles:

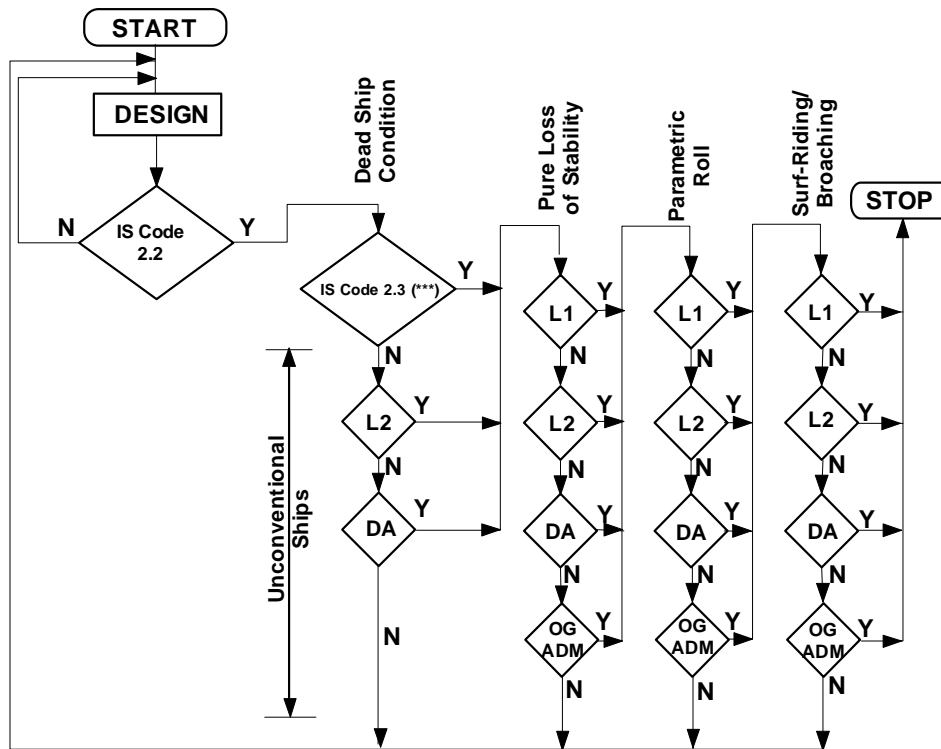
- *Nivel de vulnerabilidad 1*: Fórmulas o procedimiento sencillo basados en geometría/hidroestática, condición de carga y parámetros operacionales básicos. Complejidad: baja. Margen de Seguridad: son necesarias normas más estrictas. Objetivo: Determinar si un buque se considerará no tradicional para una modalidad específica de fallo de estabilidad;
- *Nivel de vulnerabilidad 2*: Cálculos físicos simplificados con esfuerzos informáticos reducidos y aplicación directa de acuerdo con las directrices oportunas. Complejidad: Moderada. Margen de Seguridad: moderado. Objetivo: Confirmar la vulnerabilidad a una modalidad específica de fallo de estabilidad y justificar la aplicación de la evaluación directa de la estabilidad para esta modalidad;
- *Evaluación directa de la estabilidad*: Estos criterios deberían basarse en los conceptos más avanzados y adecuados existentes. A continuación figura lo que se consideran las prescripciones mínimas de los métodos de evaluación directa de la estabilidad para garantizar la solidez física. Debería utilizarse la simulación numérica en el dominio del tiempo con el método "híbrido" y la teoría de la probabilidad, según proceda, para la modalidad de fallo que se esté examinando. El método "híbrido" incluye modelos de viscosidad empírica + flujo potencial. Específicamente, un modelo dinámico no lineal de cuerpo rígido con presión de la ola no alterada (supuesto de Froude-Krylov). Cuando proceda, debería incluirse la formulación específica para la masa añadida/amortiguación de la ola, /difracción, coeficientes especificados externamente para la viscosidad/componentes de la sustentación hidrodinámica de la amortiguación del balance y las maniobras, y fuerza de propulsión, acciones ambientales externas. Deberían establecerse directrices y procedimientos adecuados (por ejemplo, diagrama de dispersión de la ola, condiciones de funcionamiento del buque, etc.). Está previsto que la evaluación se realice con un método probabilista para determinar el nivel de seguridad;
- *Orientaciones operacionales*: Si se aplican, las orientaciones operacionales específicas del buque deberían basarse en los resultados del procedimiento de evaluación directa de la estabilidad y en el análisis de los fallos de estabilidad. Objetivo: Contribuir al funcionamiento seguro de un buque vulnerable.

## 10. La situación después SLF53

En el ámbito del SLF53 ha sido decidida la estructura futura de los Criterios de Estabilidad a barco sin avería, que resulta como en Fig. 9.

Los modos y los niveles de tomar en consideración han sido indicados en los párrafos anteriores. Para la mayor parte de ellos han sido avanzadas una o más propuestas a la OMI (entre cuyo algunas con contributos italianos [25-27]). En el caso de presencia de más

propuestas ya están en fase avanzada los procesos de armonización para poder tener a disposición, por el SLF54 un cierto número de metodologías completas sobre las que completar los procesos de verificación y validación para poder iniciar la aplicación a casos típicos.



\*\*\* = WeC possibly amended with steepness table from MSC.1/Circ.1200

Fig. 9. Estructura de los criterios de estabilidad a barco íntegro como previsto a régimen después de la formulación, verificación y validación y suficiente experiencia en la aplicación.

## 12. Conclusiones

En el curso de este sintético escursus histórico, se ha visto que el desarrollo de los criterios de estabilidad de primera generación a nivel internacional ha partido muy tarde sea con respecto de los desarrollos científicos que a la institución de la OMI. Los grandes precursores pueden ser identificados en Moseley, Rahola y Pierrottet. Una vez iniciado el proceso, con la conclusión de SOLAS' 60, el progreso ha sido importante, pero bastante lento hasta la adopción del Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI, contenido en el Res. A.749. A partir del 2001, año del principio del proceso de revisión del Código, el progreso ha sido muy rapido, también para la mayor conciencia de los peligros y las posibilidades conectadas con los Congresos y Workshop sobre la Estabilidad, que se desarrollan con cadencia anual y grande participación, y a la institución de parte de la ITTC de un Comité Especializado

"Estabilidad en Olas". Una importante contribución ha sido provista por la escuela italiana sea como crítica de los criterios de la primera generación que en el desarrollo de procedimientos alternativos y en la formulación de los criterios de la segunda generación.

Características innovativas de la actitud adoptada a la OMI son:

- el paso de una actitud re-activa a una pro-activa;
- el desarrollo de criterios basados sobre las efectivas prestaciones en mar con olas;
- la estructuración de los nuevos criterios en 3+1 niveles sobre la base de un enfoque cost-effective;
- la gran colaboración internacional que está naciendo alrededor de la formulación de los nuevos criterios.

### 13. Bibliografía

1. Francescutto, A., Papanikolaou, A. D., "Buoyancy, Stability and Subdivision: From Archimedes to SOLAS2009 and the Way Ahead", *Int. Journal of Engineering for the Maritime Environment (Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part M)*, Vol. 225, 2011, pp. 17-32. See also: Nowacki, H., Ferreiro, L. D., "Historical Roots of the Theory of Hydrostatic Stability of Ships", in "Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves", M. A. S. Neves et al. Ed., Springer Series "Fluid Mechanics and Its Applications" Vol. 96, Springer Science & Business Media 2011, pp. 141-180.
2. Ferreiro, L. D., "Measure of the Earth: The Enlightenment Expedition that Reshaped Our World", New York, Basic Books, 2011.
3. Ferreiro, L. D., "Ships and Science: The Birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800", Mit Press, 2007.
4. Moseley, H., "On the Dynamical Stability and on the Oscillations of Floating Bodies", *Phil. Trans. of the Royal Society of London*, Vol. 140, 1850, pp. 609-643.
5. Rahola, J., "The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability Especially Considering the Vessels Navigating Finnish Waters", PhD Thesis, Technical University of Finland, Helsinki, 1939.
6. Pierrotet, E., "Standards of Stability for Ships", *Trans. Institution of Naval Architects*, Vol. 77, 1935, pp. 208-222.
7. Francescutto, A., "Is it Really Impossible to Design Safe Ships?", *Trans. Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 135, 1993, pp. 163-173.
8. Yamagata, M., "Standard of stability adopted in Japan", *Trans. Institution of Naval Architects*, Vol. 101, 1959, pp. 417-443.
9. Cardo, A., Francescutto, A., Nabergoj, R., "Ultraharmonics and Subharmonics in the Rolling Motion of a Ship: Steady-state Solution", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 28, 1981, pp. 234-251.
10. Contento, G., Francescutto, A., "Bifurcations in Ship Rolling: Experimental Results and Parameter Identification Technique", *Ocean Engineering*, Vol. 26, 1999, pp. 1095-1123.
11. Bulian, G., Francescutto, A., Dattola, R., "On the Possibility of Parametric Rolling for Naval Vessels", *Proc. Int. Conf. on Marine Research and Transportation – ICMRT'05*, Ischia, 2005, P. Cassella Ed., pp. 35-42.

12. Francescutto, A., "An Experimental Investigation of Parametric Rolling in Head Waves", Trans. ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 123, 2001, pp. 65-69.
13. Francescutto, A., Dessi, D., Penna, R., "Some Remarks on the Nonlinear Modelling of Parametric Rolling", Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Symp. on Offshore and Polar Engineering - ISOPE'2001, Stavanger, 2001, Vol. 3, pp. 317-320.
14. Francescutto, A., Bulian, G., Lugni, C., "Nonlinear and Stochastic Aspects of Parametric Rolling Modeling", Marine Technology, Vol. 41, 2004, pp 74-81.
15. Bulian, G., Francescutto, A., "Theoretical Prediction and Experimental Verification of Multiple Steady States for Parametric Rolling", Proc. 10<sup>th</sup> Int. Ship Stability Workshop - ISSW'08, Daejeon, 2008, pp. 31-45.
16. Francescutto, A., "La Compartimentazione delle navi", Università degli Studi di Trieste, Edizione 2010.
17. Francescutto, A., "Intact Ship Stability - The Way Ahead", Marine Technology, Vol. 41, 2004, pp. 31-37.
18. Francescutto, A., "Intact Stability of Ships: Recent Developments and Trends", Proc. 10<sup>th</sup> Int Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures – PRADS'07, Houston, 2007, Vol. 1, pp. 487-496.
19. Francescutto, A., "L'evoluzione delle normative di stabilità per i pescherecci", in "Marambiente, tecnologie innovative per una nautica sostenibile", a cura di F. Grossi, GTC Editore, Udine, 2010.
20. Francescutto, A., Serra, A., Scarpa, S., "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE'2001, Rio de Janeiro, 2001, Vol. 1, pp. 829-836.
21. Bertaglia, G., Francescutto, A., Serra, A., Cafagna, F., "The Possible Evolution of Weather Criterion for Ships with High Values of KG/T and B/T and Its Impact on Design", Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Marine Design IMDC'03, Athens, 2003, A. D. Papanikolaou Ed., Vol. I, pp. 183-193.
22. Bertaglia, G., Serra, A., Bulian, G., Francescutto, A., "Experimental Evaluation of the Parameters for the Weather Criterion", Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles – STAB'03, Madrid, 2003, L. Pérez Rojas Ed., pp. 253-263.
23. Bulian, G., Francescutto, A., Fucile, F., Cafagna, F., Genuzio, D. H., Maccari, A., "Heeling Moment in the Alternative Assessment of the Weather Criterion: Direct Experiments and Numerical Calculations", Proc. 4<sup>th</sup> Int. Marine Conference on Design for Safety, Trieste, 2010, pp. 107-121.
24. Francescutto, A., Umeda, N., "Current Status of New Generation Intact Stability Criteria Development", Proc. 11<sup>th</sup> Int. Ship Stability Workshop, Wageningen, 2010, pp. 1-5.
25. Bulian, G., Dreossi, M., Francescutto, A., Maccari, A., Serra, A., "The Development of an Alternative Assessment to Weather Criterion on Experimental Basis", Proc. Int. Conf. on Ship and Shipping Research NAV'06, Genova, 2006, Vol. I, pp. 4.2.1-4.2.15.
26. Bulian, G., Francescutto, A., "New Generation Intact Stability Criteria: Assessing the Vulnerability to Parametric Roll", Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. of Ship and Shipping Research – NAV'09, Messina, 2009, Vol. I, pp. 135-144.

27. Bassler, C., Belenky, V., Bulian, G., Francescutto, A., Spyrou, K., Umeda, N., “A Review of Available Methods for Application to Second Level Vulnerability Criteria”, in “Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves”, M. A. S. Neves et al. Ed., Springer Series “Fluid Mechanics and Its Applications” Vol. 96, Springer Science & Business Media 2011, pp. 3-23.

Se hace además referencia a los siguientes documentos de la OMI:

- MSC/Circ.707 (1995), “Orientación que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas con mar de popa o de aleta”.
- MSC.1/Circ. 1200 (2006), “Interim guidelines for alternative assessment of weather criterion”.
- MSC.1/Circ. 1227 (2007), “Notas explicativas de las directrices provisionales para la evaluación alternativa del criterio meteorológico”.
- MSC.1/Circ. 1228 (2007), “Orientación revisada que sirva de guía al capitán para evitar situaciones peligrosas en condiciones meteorológicas y estados de la mar adversos”.
- MSC.1/Circ. 1281 (2008), “Explanatory Notes to the International Code on Intact Stability. Res. A.749 (18) (1995), “Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI”, IMO Publication, 1995.
- SLF44/INF.6 (2001), “Weather criterion for large passenger ships”, Submitted by Italy.
- SLF50/4/4 (2007), “Marco para la elaboración de una nueva generación de criterios de estabilidad sin avería”, Nota presentada por los Estados Unidos, el Japón y los Países Bajos
- SLF52/WP.1 (2010), “Elaboración de Criterios de Estabilidad sin Avería de Nueva Generación - Informe del Grupo de trabajo (parte 1)”.
- SLF53/WP.4 (2011), “Elaboración de Criterios de Estabilidad sin Avería de Nueva Generación - Informe del Grupo de trabajo (parte 1)”.