



TRABAJO FIN DE GRADO

Curso 2013-2014

Estabilidad de buques

Tutor/es: José Agustín González Almeida

Alumno: Eduardo Javier Báez Delgado

Grado: Náutica y Transporte Marítimo

Universidad de La Laguna
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Sección Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo presentado para
la obtención del título de:**

GRADUADO EN NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

Presentado por
Eduardo Javier Báez Delgado

Estabilidad de buques

Dirigido por
José Agustín González Almeida
Presentado en septiembre de 2014



D. José Agustín González Almeida, Profesor perteneciente al área de Construcciones Navales del Departamento de Ciencias de la Navegación, Ingeniería Marítima, Agraria e Hidráulica de la Universidad de La Laguna certifica que:

D. Eduardo Javier Báez Delgado, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado: Estabilidad de buques.

Revisado dicho trabajo, estimo que reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que le sea asignado.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente Certificado en Santa Cruz de Tenerife, Septiembre de 2014.

Fdo. José Agustín González Almeida

Tutor del trabajo

Resumen

La temática de este trabajo surge como medida para intentar conocer un poco más allá del mero cálculo del complicado mundo del estudio de la estabilidad de los buques, que tan importante es para los oficiales de cubierta.

Este trabajo comienza con una serie de descripciones de accidentes marítimos, donde los buques por diversas causas, han perdido la estabilidad y en algunos casos han llegado a zozobrar con fatales consecuencias. A continuación el trabajo continúa con un desarrollo histórico desde los tiempos de Arquímedes hasta nuestros días con los grandes avances que fueron haciendo conocidos científicos, arquitectos navales y navegantes. Hoy en día, los complejos cálculos de estabilidad en muchos casos se seguirán ejecutando a mano por parte de los oficiales de cubierta, y en otros muchos, con el avance de las nuevas tecnologías, se han ido desarrollando programas que hacen dichos cálculos. En esta parte se expondrán algunos ejemplos de programas utilizados por muchas navieras en sus buques para realizar esta tarea abordo.

Hoy día, como en cualquier actividad en el mundo de la mar, está todo regulado por distintas normas, convenios, etc. En el trabajo se le dedica una parte a la evolución que han tenido los criterios de estabilidad desde su aparición e implantación, y se explicarán dos de los más importantes, el Criterio General de Estabilidad de la OMI y el Criterio de Rahola, que si bien en la actualidad la mayor parte de los buques están englobados dentro de los de la normativa de la OMI, el criterio de Rahola por su sencillez de aplicación y comprensión se sigue usando por muchos oficiales de cubierta abordo.

Para concluir el trabajo, se ha realizado un pequeño estudio comparando la estabilidad estática transversal de dos buques de la Naviera Armas en tres situaciones de carga distintas.

Índice general

Índice de imágenes.....	10
Índice de tablas.....	11
Acrónimos.....	12
1. Introducción.....	14
2. Objetivos.....	15
2.1 Accidentes marítimos.....	15
- M/V Deneb.....	15
- M/V Cougar Ace.....	16
- M/S Estonia.....	17
- M/V Herald of Free Enterprise.....	17
- M/V Stellamare.....	18
3. Antecedentes.....	19
3.1 Desarrollo histórico de la estabilidad del buque.....	19
4. Desarrollo.....	26
4.1 Conceptos de estabilidad.....	26
4.2 Evolución de los cálculos de estabilidad.....	34
4.2.1 Programas de estabilidad.....	40
4.3 Criterios de estabilidad.....	46
4.3.1 Criterio general de estabilidad de la OMI.....	52
4.3.2 Criterio de Rahola.....	59
5. Comparativa de estabilidad entre los buques Volcán de Timanfaya y Volcán del Teide ..	61
5.1 Características generales de las embarcaciones.....	63
5.1.1 Volcán de Timanfaya.....	63
5.1.1.1 Operatividad del buque.....	65
5.1.1.2 Entrada de la carga al buque.....	65
5.1.1.3 Tipos de cargas.....	66
5.1.1.4 Espacios de carga.....	67
5.1.2 Volcán del Teide.....	69
5.1.2.1 Entrada de la carga al buque.....	70
5.1.2.2 Tipos de cargas.....	71

5.1.2.3 Espacios de carga	72
5.2 Análisis de la estabilidad.....	73
5.2.1 Comparación en un viaje habitual.....	73
5.2.2 Comparativa a máxima carga.....	75
5.2.3 Comparativa en lastre.....	77
6. Conclusión de la comparativa de estabilidad	80
Bibliografía	82

Índice de imágenes

Imagen 1. Buque Deneb	2.1
Imagen 2. Buque Cougar Ace	2.1
Imagen 3. Buque Estonia	2.1
Imagen 4. Buque Herald of Free Enterprise	2.1
Imagen 5. Buque Stellamare	2.1
Imagen 6. Captura de pantalla Easeacon	4.2.1
Imagen 7. Captura pantalla programa CPC 2.0	4.2.1
Imagen 8. Captura de pantalla programa CPC 2.0	4.2.1
Imagen 9. Volcán de Timanfaya atracado en Morrovable	5.1.1
Imagen 10. Volcán del Teide	5.1.2

Índice de tablas

Tabla 1. Valores mínimos GZ para ángulos de escora	4.3.2
Tabla 2. Trincaje para navegación entre islas	5
Tabla 3. Trincaje para navegación internacional	5
Tabla 4. Características buque “Volcán de Timanfaya”	5.1.1
Tabla 5. Dimensiones de los accesos	5.1.1.2
Tabla 6. Ancho de los accesos	5.1.1.2
Tabla 7. Características buque “Volcán del Teide”	5.1.2
Tabla 8. Capacidad máxima de carga del Volcán del Teide	5.1.2.3
Tabla 9. Comparativa en viaje habitual	5.2.1
Tabla 10. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola	5.2.1
Tabla 11. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola	5.2.1
Tabla 12. Comparativa en máxima carga	5.2.2
Tabla 13. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola	5.2.2
Tabla 14. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola	5.2.2
Tabla 15. Comparativa en lastre	5.2.3
Tabla 16. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola	5.2.3
Tabla 17. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola	5.2.3

Acrónimos

Ro-Ro	Roll on-Roll off
Ro-Pax	Roll on-Roll off y pasaje
STAB	The International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles
ISSW	International Ship Stability Workshops
IMO	International Maritime Organization
OMI	Organización Marítima Internacional
IACS	International Association Classified Society
IMDG	International Maritime Dangerous Goods
ISO	International Organization for Standardization
HMC BV	Hydrographic and Marine Consultants B.V.
TEU	Twenty Equivalent Unit
EDI	Electronic Data Interchange
SLF	Stability and Load Line on Fishing Vessels Safety
MSC	Maritime Safety Committee
SOLAS	Safety Of Life At Sea
DSA	Direct Stability Assessment
BOE	Boletín Oficial del Estado
MGS	Manual de Gestión de Seguridad

1. Introducción

Este trabajo tratará sobre la estabilidad de los buques, enmarcada dentro de los conocimientos de Arquitectura naval, que es la ciencia que comprende la construcción y estudios sobre el comportamiento del Buque.

La Arquitectura naval queda dividida en dos ramas de conocimientos distintos, la Construcción Naval, donde se estudia la estructura de la nave, las distintas características del casco según la función del buque y todo lo derivado con la parte estructural, ya sean refuerzos o espesores de planchas. Y la Teoría del Buque, donde se estudia a partir de las formas exteriores del casco, su comportamiento en la mar en distintas condiciones de navegación, y es aquí donde queda enmarcado el tema del que trata el trabajo, la estabilidad.

La estabilidad es uno de los aspectos más importantes a considerar antes de salir a la mar y durante la navegación en un buque, puesto que con su estudio, se puede conseguir un mejor entendimiento de los movimientos y reacciones del buque en distintas situaciones de navegación como en maniobras de carga y descarga en puerto, y así poder evitar posibles accidentes, relacionados directamente la mayor parte de las veces con condiciones meteorológicas y situaciones de una mala estiba.

2. Objetivos

Durante la historia de la navegación han ocurrido diversos accidentes relacionados con la pérdida de estabilidad por distintas causas, desde malas estibas hasta despistes de la tripulación que provocan graves problemas de estabilidad y por consiguiente la zozobra del buque. Con este trabajo, y conociendo la importancia que tiene desgraciadamente sólo con observar parte de la historia negra de la navegación, se intenta conocer más de tan importante tema en el mundo de los barcos más allá de los cálculos que se aprenden en clase, haciendo un repaso histórico de los progresos que se han ido realizando a medida que han ocurrido sucesos o avanzando las tecnologías, sus legislaciones y regulaciones, así como aplicar lo aprendido a un estudio de estabilidad.

2.1 Accidentes marítimos

Aunque se ha avanzado mucho en los estudios, todavía hoy en día se puede dar una cuenta de que es una parte en la que se debe seguir realizando avances para así conseguir una mejora en la seguridad de la navegación. Algunos accidentes marítimos ocurridos a lo largo de los últimos años han sido estos:

- M/V Deneb

En 2011 el buque portacontenedores “Deneb” de 101 m de eslora volcó sobre el muelle Juan Carlos I en el puerto de Algeciras.



Imagen 1. Buque Deneb [1]

La causa del vuelco fue debida a que los 150 contenedores que se llegaron a estibar en el mercante, contenían 241 toneladas más de mercancía que la declarada por sus propietarios y 332 más que el peso utilizado para los cálculos de estabilidad. [1]

- M/V Cougar Ace

El Cougar Ace es un buque Roll on-Roll off de 200 m de eslora con bandera de Singapore.

El buque se escoró el domingo 23 de Julio de 2006 por la noche después de que los miembros de la tripulación comenzaran una maniobra de achique de lastres. El buque quedó virtualmente acostado en sólo 10 minutos.

Los tripulantes fueron rescatados durante un espectacular operativo que involucró tres helicópteros operados por la Guardia Aérea Nacional de Alaska y el Cuerpo de Guardacostas. [2]



Imagen 2. Buque Cougar Ace [3]

En la imagen se puede observar la enorme escora que adoptó el buque.

- M/S Estonia

En septiembre de 1994 este buque Ro-Pax de 155 m de eslora se encontraba navegando en una gran tormenta en el Norte del Mar Báltico. A causa de un fallo estructural en el yelmo de proa este se desprendió y cayó al mar dejando una apertura en el casco. El agua empezó a entrar y en menos de media hora se hundió. En este accidente murieron 850 personas. [4]



Imagen 3. Buque Estonia [5]

- M/V Herald of Free Enterprise

En 1987 este buque de tipo Ro-Pax zozobró y se hundió rápidamente tras zarpar de Zeebrugge en Bélgica. El accidente se produjo por negligencia de la tripulación al dejar abierto el yelmo de proa. Tras zarpar del muelle, el agua empezó a entrar y llenó la cubierta de carga de vehículos, creando una enorme superficie libre que desestabilizó al buque hasta hacerlo zozobrar. En este trágico accidente murieron 193 personas. [6]



Imagen 4. Buque Herald of Free Enterprise [6]

- M/V Stellamare

El 9 de Diciembre del 2003 el buque M/V Stella Mare, de 88 m de eslora y bandera holandesa escoró de manera brusca en el puerto de Albany, NY, en el rio Hudson. Tenía 661 toneladas de carga en turbinas. Sufrió un desplazamiento de la carga y volcó, provocando que ocho tripulantes fueran lanzados al agua y tuvieron que ser rescatados por helicópteros y botes. Además, otros tres tripulantes quedaron atrapados dentro del casco.

Las dos grúas del buque podían levantar juntas un máximo de 360 toneladas, pero el generador que habían levantado pesaba 500 toneladas. Para levantar esto, se requiere llevar una operación bastante larga, ya que las grúas toman el peso, se bombea agua de un lado a otro de los tanques de compensación para mantener el equilibrio del buque y se va moviendo el peso y el agua hasta que queda estable en la bodega. Los generadores que ya habían sido cargados en la bodega no habían sido anclados aun, por lo que toda la carga estaba suelta en la bodega. Al moverse el buque por el pesado generador se movió la carga y el buque se escoró en segundos. [7]



Imagen 5. Buque Stellamare [7]

3. Antecedentes

Basándose en los apuntes de clase recogidos durante la carrera respecto a este tema se puede llegar a ser esta breve introducción sobre el tema.

Todo buque debe satisfacer unas determinadas condiciones relacionadas con la parte de Teoría del buque dentro de la Arquitectura naval. Estas son la *flotabilidad*, que es la reserva de aumento de peso por inundación, dependiendo del número y posición de mamparos estancos y la situación de la línea de flotación; la *navegabilidad*, que es la seguridad del buque en la mar en condiciones adversas y depende de las forma de proa y popa; la *maniobrabilidad*, propiedad que permite al buque cambiar de rumbo y virar, y dependerá de la eslora, el calado, las hélices y el timón del buque; la *velocidad* mediante la cual el barco se desplaza para realizar sus viajes, y dependerá del desplazamiento del buque, la potencia de la máquina propulsora y la formas del casco en la obra viva; y la *estabilidad*, que es la característica mediante la cual el buque recobra su posición de equilibrio cuando por circunstancias accidentales lo han inclinado, sacándolo de ella. La estabilidad depende principalmente del reparto de pesos y las formas del buque. Puesto que las formas del buque son invariables, y los pesos sí que pueden ser variados tanto en cantidad como en su posición a bordo, a la hora de hacer un estudio, la variación de la estabilidad dependerá principalmente del desplazamiento del buque y de su estiba, puesto que son los datos que hace que cambien los valores de la estabilidad.

3.1 Desarrollo histórico de la estabilidad del buque

Desde hace muchos años el hombre se ha preocupado por buscar explicaciones a las cosas cotidianas que nos rodean, tanto para saber el porqué de las cosas como para buscar una evolución y mejora de dichos elementos. Cogiendo como referencia la tesis de Claudio Alexis Rodríguez Castillo titulada “Análisis de la estabilidad de pesqueros en olas regulares de proa” [8] para llevar a cabo un resumen histórico de la evolución que ha habido en el estudio de éste tema se ve una lenta progresión hasta

el siglo XX. Desde entonces, la necesidad de hacer la navegación más segura acorde con la evolución de las nuevas tecnologías ha dado pie a que se creen grupos dedicados al estudio y mejora de este apartado de la navegación náutica publicando normas y criterios aplicados internacionalmente. Se podría decir que todo comenzó por Arquímedes (287 - 212 AC), que en su tratado “Sobre los Cuerpos Flotantes” fue uno de los primeros en dejar constancia del estudio y análisis de la estabilidad de los buques, donde estableció una explicación científica y el cálculo cuantitativo de la estabilidad hidrostática. [9]

Durante años, otros científicos hicieron diferentes aportaciones, pero ninguno consiguió un gran avance dentro del estudio de la estabilidad y comportamiento de los buques. Simon Stevin (1548-1620) fue el primero en distinguir entre equilibrio estable e inestable y describir la paradoja hidrostática, en la cual el nivel del fluido siempre será paralelo a la superficie horizontal en virtud de la cual la presión descendente de un fluido sobre un cuerpo es independiente de la forma de éste y sólo depende de la altura y de la base del plano de carena. [10]

Otros como Christiaan Huygens (1629-1695) y Paul Hoste (1652-1700) también hicieron sus aportaciones [11]. Pero no fue hasta mediados del siglo XVIII cuando se produjo un cambio en el concepto del estudio de la estabilidad. El astrónomo y matemático francés Pierre Bouguer (1698-1758) publicó en 1746 el primer tratado de arquitectura naval, “Traite du navire”, que supuso la primera explicación del uso del centro de carena en el estudio de la estabilidad de los buques e introdujo los conceptos de metacentro y curva metacéntrica [12]. También en el mismo siglo, el matemático y físico suizo Leonhard Euler (1707-1783) publicó “Scientia Navalis”, donde definió el criterio del momento restaurador inicial [13]. La obra de Bouguer con la de Euler representa términos equivalentes en cuanto a la estabilidad hidrostática, con lo que configuraron una nueva teoría de la estabilidad del buque, y establecieron los primeros criterios para la estabilidad hidrostática.

Poco tiempo después, Jorge Juan y Santacilia (1713-1773), constructor naval y científico español, coincidió con Pierre Bouguer en una expedición de la Academie Royale des Sciences de París, donde conocería la obra de éste de la cual se interesaría por ella y continuaría con el estudio de la estabilidad del buque y sus

movimientos oscilatorios. En 1771, Juan y Santacilia publicó su libro “Examen Marítimo”, donde trató la dinámica de los barcos una vez se encuentran a flote, su comportamiento ante el empuje de las olas o su estabilidad, en la que extendió los conceptos de Bouguer para las inclinaciones longitudinales e introdujo por primera vez la definición de radio metacéntrico longitudinal. [14]

Más tarde aparecería la figura de George Atwood (1745-1807) [15], el cual sería el primero en hacer una verdadera ampliación de los conocimientos sobre la estabilidad basadas en las obras de Pierre Bouguer y Leonhard Euler. Atwood publicaría dos trabajos los cuales presentó en la Real Sociedad de Londres. El primero trata de revisar los principios físicos de la estabilidad en cuerpos como cilindros o paralelepípedos para ciertos ángulos de escora, destacando que para realizar un estudio útil de ésta se debe hacer en un rango finito de ángulos prácticos para el entendimiento de las reacciones del buque en la mar, y no solo analizando pequeños ángulos de escora, lo que se denomina la estabilidad estática inicial. El segundo trabajo de George Atwood fue una extensión del primer trabajo y contó con la colaboración del marino francés Honoré-Sébastien Vial du Clairbois (1733-1816) [16]. En el añadieron al estudio de la estabilidad las formas reales de los buques para estudiar sus movimientos en vez de usar formas geométricas sencillas. En esta obra incluyeron además, el estudio de los “momentos restauradores” del buque para un gran número de ángulos de escora, ampliando el rango de estudio hasta ahora realizado en otros trabajos, indicando que la estabilidad del buque no debe ser evaluada sólo con la estabilidad inicial, e introdujeron el término brazo restaurador, denominándolo GZ.

En el mismo siglo que Bouguer, Euler, Juan Santacilia y Atwood, el matemático, estadístico, físico y médico holandés Daniel Bernoulli (1700-1782) [17], desarrolló la primera teoría del movimiento de balance de un buque, siendo aceptada y usada hasta mediados del siglo XIX. Fue entonces cuando apareció la figura Moseley, quien utilizó por primera vez el concepto de estabilidad dinámica.

Aunque se había progresado bastante en el estudio y entendimiento de la estabilidad del buque, todavía se usaba solamente la altura metacéntrica como medida de la

estabilidad del buque. Según publica Claudio Alexis Rodríguez Castillo en su tesis el concepto de la medición de la estabilidad comenzó a ser influenciada directamente por la ciencia a partir de grandes desastres marítimos acaecidos en un mismo espacio-tiempo.

“La tragedia del buque “CAPTAIN” que naufragó durante una tormenta en la Bahía de Vizcaya atrajo la atención de los arquitectos navales para la estabilidad a grandes ángulos de escora:

El “CAPTAIN” era un buque de guerra construido por el capitán Cowper Coles, un brillante especialista en Artillería Naval de la Armada Británica. La figura 1.1 ilustra los brazos adrizantes de este buque, y la de un buque semejante, el “MONARCH”.

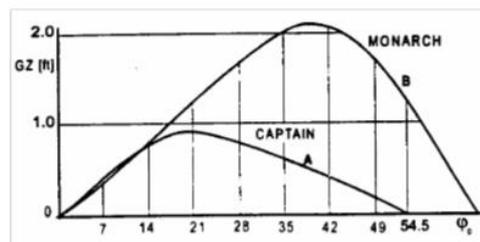


Figura 1.1 Curvas de brazos adrizantes del “CAPTAIN” y del “MONARCH”

El “MONARCH”, construido por el no menos brillante ingeniero naval e inspector del Almirantazgo Británico Edgard Reed, tenía un diseño tradicional similar al del “CAPTAIN” sólo que con francobordo alto. Los metacentros de ambos buques eran similares (luego, su estabilidad inicial también), sin embargo, los rangos de sus brazos de adrizamiento eran bastante diferentes. En Septiembre de 1870, ambos buques navegaban en la Bahía de Vizcaya en condiciones climáticas moderadas, cuando durante una breve tormenta el “CAPTAIN” naufragó llevándose con él las vidas de quinientas personas, entre ellas la del capitán Coles. Durante la construcción del “CAPTAIN”, el almirante Reed había advertido al Almirantazgo Británico que la curva de momentos adrizantes del “CAPTAIN” era insuficiente, pero sus advertencias no fueron escuchadas. Luego del desastre, la importancia de la estabilidad a grandes ángulos de escora fue reconocida, y la curva de momentos adrizantes pasó a ser llamada de Curva de Reed [Reed, 1868]”. [8]

Tras el avance en el estudio y comprensión de la estabilidad de los buques y los nombrados accidentes a finales del siglo XIX, aparecieron las propuestas de los primeros criterios para valores mínimos de varios parámetros de estabilidad, aunque no fue hasta después de varios graves accidentes cuando se decidió adoptar estas propuestas como recomendaciones aunque sin poder legal alguno.

En 1940, el profesor finlandés de la Universidad Tecnológica de Helsinki, Jaakko Juhani Rahola (1906-1973) [18], basándose en el análisis de distintos accidentes marítimos desarrolló en su tesis doctoral “The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum amount of Stability”, un método donde establecía unos valores mínimos de los parámetros de estabilidad. Tal fue la aceptación de su método que muchos países lo usaron, hasta que finalmente en 1968 la Organización Marítima Internacional, publicó una recomendación internacional sobre criterios de estabilidad basada fundamentalmente en el método que había propuesto Rahola.

La aceptación del criterio propuesto por Rahola en la Organización Marítima Internacional, supuso el comienzo de la investigación por encontrar métodos y normas para asegurar la integridad de los buques, basándose en establecer unos estándares de estabilidad para diversos tipos de barcos. En estos programas de investigación participaron numerosas organizaciones y universidades de todo el mundo, dando como resultado diversas normas y recomendaciones.

Hasta finales de la década de 1950, la estabilidad era tratada de forma prácticamente estática y las investigaciones se centraban en la mejora de los métodos de cálculo de las curvas de brazos de adrizamiento y la estima de los momentos escorantes estáticos y dinámicos. El movimiento de balance del buque navegando en olas era considerado sobre la base de lo propuesto por el ingeniero hidráulico y arquitecto naval inglés William Froude (1810-1879) [19] y el ingeniero naval ruso Alexei Krylov (1863-1945) [20], que consideraban olas regulares y pequeñas inclinaciones. Sólo después de la publicación del trabajo de St. Denis y Pierson en 1953, esta herramienta estuvo disponible para investigar la estabilidad del buque en la mar, considerando el buque como sistema dinámico.

En 1975 por iniciativa del profesor Chengi Kuo, de la Universidad de Strathclyde, Escocia, se empieza a celebrar periódicamente la Conferencia sobre la estabilidad de los buques y vehículos oceánicos (STAB, en inglés, The International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles). Como tal, la Conferencia STAB es el encuentro profesional más representativo en el ámbito de la estabilidad y la seguridad en general de los buques en el mundo. Desde el principio, los objetivos de la Conferencia fueron proporcionar una oportunidad para que las personas involucradas en actividades de estabilidad, incluyendo el diseño, operación, investigación o control, pudiesen discutir los resultados de los estudios a nivel internacional, y establecer cómo estos resultados pueden ser aplicados en el uso real. [21]

Mientras que las Conferencias STAB se destinan a cubrir una amplia gama de temas relacionados con la estabilidad de los buques y vehículos oceánicos, desde 1995 casi todos los años también se está celebrando una serie de talleres internacionales sobre la estabilidad de buques (ISSW, de International Ship Stability Workshops) como eventos especializados complementarios a las Conferencias STAB. Los talleres suelen centrarse en temas particulares que son de vital importancia y en los avances de los desarrollos contemporáneos en el ámbito de la estabilidad y la seguridad. [21]

Las Conferencias STAB e ISSW los están organizando un Comité Permanente Internacional, formado por especialistas reconocidos internacionalmente cuya labor se centra en el ámbito de todo el mundo. [21]

Como resultado de la buena labor ejercida en estas conferencias, las actas de las STAB y de los ISSW representan una fuente fundamental y única de la información y el conocimiento para todos aquellos que están involucrados, o tiene la intención de participar, en la investigación básica y aplicada, la evolución de la regulación, u otras actividades consideradas de contribución al cuerpo de conocimiento y comprensión del tema de la estabilidad y la seguridad de los buques. [21]

Aunque los resultados logrados por estos trabajos son relevantes y del punto de vista práctico la introducción de los estándares internacionales de la IMO haya significado

un incremento en la seguridad de los buques, continúan ocurriendo accidentes relacionados con la estabilidad del buque, inclusive en casos donde se ha cumplido con los criterios de estabilidad y normas de seguridad. Por eso, nuevos retos van surgiendo a medida que nuevas formas y tipos de buques aparecen.

4. Desarrollo

4.1 Conceptos de estabilidad

Una vez hecho un repaso histórico de como se ha tratado la estabilidad a lo largo de los años, para hacer un estudio de ésta hay que conocer determinados conceptos importantes relacionados con la estructura y forma del casco, con los repartos de pesos y los distintos movimientos que se producen en el buque cuando se encuentra flotando dentro de los seis ejes de libertad, donde para estos casos también se denomina el buque como flotador.

Las dimensiones principales del buque son tres:

- Eslora: distancia medida horizontalmente en el sentido longitudinal del buque.

Según las referencias que se tomen hay distintas denominaciones de eslora, siendo las más usuales la eslora total o máxima, hallada desde los puntos más salientes de proa y popa, y la eslora entre perpendiculares, que es la distancia longitudinal comprendida entre las perpendiculares de proa y popa. [22]

- Manga: distancia medida horizontalmente en el sentido transversal del buque. Al igual que en la eslora, existen distintas denominaciones de mangas, siendo las más comunes la manga total o del buque, que es la medida en la perpendicular media del buque, y la manga de trazado, que es la anterior restándole el espesor del forro del casco. [22]

- Puntal: es la distancia vertical de un buque normalmente medido desde la quilla, y variando hasta donde se tome la referencia.

La expresión más usada es la de puntal de trazado, que sería la distancia vertical medida en el centro del buque desde la cara exterior de la quilla hasta la parte superior del bao de la cubierta principal. [22]

A la hora de dimensionar lo que es el buque se puede dividir en dos partes:

- Obra viva o carena: es la parte sumergida del buque por debajo de la línea de flotación.

- **Obra muerta:** es la parte estanca del buque por encima del plano de flotación. La altura que existe desde la quilla hasta la línea de flotación se denomina calado, es decir, la distancia vertical de la obra viva. Para medir los calados se usan unas escalas pintadas en el casco desde la quilla en las perpendiculares. Dichas perpendiculares serían la perpendicular de popa, que sería la que pasa a la altura del eje del timón; la perpendicular de proa estaría trazada por la intersección de la cara de proa de la roda con la flotación en carga de verano. [22]

Las escalas de calados se pueden ver en distintas unidades, las más comunes son en metros, decímetros y pies. [22]

Analizando los calados del buque se puede deducir el asiento o trimado, que es la diferencia de calados entre popa y proa. El asiento puede ser apopante o positivo, cuando el calado de popa es mayor que el de proa, y aproante o negativo, cuando el calado en proa es mayor que el de popa. [22]

A su vez, analizando el asiento se obtiene la alteración, que es el cambio de asiento del buque por traslado o embarque de pesos abordo. La alteración puede ser positiva o apopante y negativa o aproante.

Analizando ahora la obra muerta, nos encontramos con otro término importante en un buque, el francobordo. Se le denomina de esta manera a la distancia medida en el costado del buque, desde la cara superior de la cubierta principal, hasta el centro del disco de máxima carga, en la sección media. La importancia del francobordo para el buque es que limita los esfuerzos estructurales del casco dentro de ciertos valores y asegura unos valores mínimos del brazo GZ para grandes inclinaciones, consiguiendo así establecer una reserva de flotabilidad predeterminada. Para calcular el francobordo se usa el “Convenio internacional sobre líneas de carga” publicado por la OMI. [23]

Teniendo en cuenta lo anterior, para el estudio y la comprensión de la estabilidad de un buque también hay que tener en consideración las curvas hidrostáticas, donde se

encuentran todos los datos necesarios para los diferentes tipos de cálculos que se usan en el tema de la estabilidad. En ellas se representan las características básicas que dependen de la geometría del buque. Estas son unas gráficas en las que entrando en el eje de ordenadas con el calado medio del buque obtenemos valores de desplazamiento, volumen de carena, posición longitudinal y vertical del centro de carena, área de la flotación, posición longitudinal del centro de flotación...

Los datos que se proporcionan en las curvas hidrostáticas se calculan a partir de los planos de formas, por lo que dependen de la geometría del buque que se trate. Las flotaciones para las que se obtiene la información son paralelas entre si y el asiento de los calados suele ser cero, puesto que, generalmente, es el valor del asiento de construcción en los buques mercantes. [23]

Las curvas que se representan son las siguientes:

- ∇ , volumen de carena en m^3
- Δ , desplazamiento del buque en Tm, en agua salada de densidad 1,025
- A_f , áreas de flotación en m^2
- A_x , área de la cuaderna maestra en m^2
- XF, posición longitudinal del centro de flotación en m
- XC, posición longitudinal del centro de carena en m
- KC, posición vertical del centro de carena en m
- KM o CM, altura del metacentro transversal sobre la quilla o radio metacéntrico transversal, respectivamente en m
- KM_L o CM_L , altura del metacentro longitudinal sobre la quilla o radio metacéntrico longitudinal, respectivamente en m.
- Tc, toneladas por centímetros de inmersión en Tm/cm
- M_u momento de asiento unitario en Tm*m/cm
- K_b , coeficiente de bloque
- K_s , coeficiente de afinamiento de la superficie de flotación
- K_m , coeficiente de afinamiento de la cuaderna maestra
- K_p , coeficiente de afinamiento prismático

Para el uso de las tablas hidrostáticas y otros cálculos abordo es necesario conocer qué es el desplazamiento del buque. El desplazamiento se trata del peso del buque, que es el equivalente al peso del volumen de agua desalojado por la obra viva de éste. Para que el dato del desplazamiento del buque sea útil se debe regir por una serie de condiciones para todos los buques, existiendo varios tipos:

- Desplazamiento en rosca: peso del casco + peso de la máquina
- Desplazamiento en lastre: peso del casco + peso de la máquina + peso del lastre
- Desplazamiento en máxima carga: peso del casco + peso de la máquina + peso del lastre + peso de la máxima carga a embarcar o peso muerto

Al hablar de desplazamiento en rosca y en lastre se menciona el peso del casco y el peso de la máquina y peso de lastre. El peso del casco incluye no sólo el peso de la estructura del buque, sino también el material y equipo de cubierta, amarre, fondeo, seguridad... El peso de la máquina en toneladas incluye el equipo propulsor, es decir, el peso de las máquinas y calderas principales y auxiliares, así como el de los diversos elementos contenidos en él o en los compartimentos en que esté instalado el equipo propulsor, tales como instalaciones eléctricas, bombas, compresores, tuberías, botellas de aire, tanques independientes, piezas de respeto... [23]

Cuando se habla de estabilidad se diferencia entre dos tipos:

- Estática: condición de equilibrio del buque, resultante del par de fuerzas al que está sometido.
- Dinámica: condición de equilibrio del buque, resultante del trabajo efectuado por el par de fuerzas al que está sometido.

Además hay que hacer una distinción cuando se habla de la estabilidad, y es que hay que considerar también la estabilidad inicial, que dependiendo del diseño del casco del buque puede variar. Los barcos con costados en forma de “U” la estabilidad inicial abarca desde los 0° hasta 15° o 20°. Por el contrario, los barcos con costados con forma de “V” su estabilidad inicial va desde los 0° a los 5° o 10°. Para los ángulos de cabeceo, solo se estudia la estabilidad longitudinal inicial. [22]

Fundamentalmente a bordo cuando se habla de la estabilidad, se habla concretamente de la estabilidad estática transversal, y la definimos como la capacidad del buque de recuperar su posición inicial de equilibrio cuando ha sido apartado de ella por una causa externa. Se considera que el buque se encuentra en equilibrio cuando el peso del buque aplicado en el centro de gravedad y el empuje, aplicado en el centro de carena son dos fuerzas iguales aplicadas en la misma dirección y en sentido contrario. Por tanto, el centro de gravedad y el centro de carena se encuentran situados en la misma vertical, y el desplazamiento y el empuje, son dos fuerzas iguales aplicadas en la misma dirección pero en sentido contrario. [22]

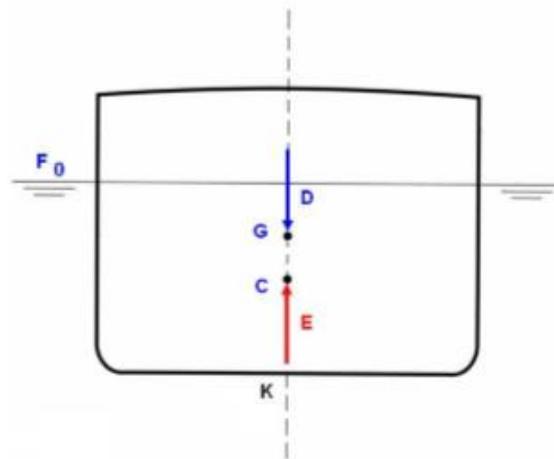


Figura 1. Diagrama de estabilidad [22]

Términos usados comúnmente a la hora de hablar de la estabilidad:

-Metacentro o metacentro transversal inicial (M), es el centro, es el centro de curvatura de la curva “C” proyección. La curva “C” proyección es las infinitas posiciones que puede adoptar el centro de carena girando 360° alrededor de un eje longitudinal. También se puede definir como el punto en el que se cortan las dos líneas de empuje. La línea de empuje es la línea por la que pasa la fuerza de empuje vertical aplicada en el centro de carena. [22]

Hasta inclinaciones de 10°, el metacentro no varía su posición, estando situado en el plano de crujía.

La altura del metacentro desde la quilla KM, está tabulada en las curvas hidrostáticas.

-Radio metacéntrico transversal (C_0M_0), es el radio de la curva “C” proyección. Al aumentar el calado medio del buque, desciende la posición del metacentro transversal, por lo que disminuye el valor del radio metacéntrico transversal. [22]

-Falsos metacentros, son los puntos de intersección de las líneas de empuje con el plano diametral del buque o plano de crujía. También se pueden definir como la intersección de los radios metacéntricos (C_0M_0) con el plano de crujía. Para pequeñas escoras (estabilidad inicial) el metacentro se mantiene en el plano diametral o plano de crujía, por lo que coincide con el falso metacentro. A medida que aumenta la escora, las líneas de empuje se cortarán cada una de ellas con la anterior dando lugar a los metacentros o prometacentros, situados fuera del plano diametral. [22]

-Altura metacéntrica (GM), es la distancia entre la posición vertical del centro de gravedad y la posición del metacentro transversal inicial para una condición de carga. Este valor es el que nos da idea de la estabilidad estática transversal inicial. El valor de la altura metacéntrica puede ser negativo, positivo o nulo, en función de si M se encuentra situado por encima, por debajo o coincidente con el centro de gravedad. [22]

-Diagrama metacéntrico transversal, se trata de una gráfica donde se representan los valores de las alturas de los metacentros (KM) y las alturas de los centros de carena (KC), obtenidos de las curvas hidrostáticas. Para trazar el diagrama metacéntrico, se trazan primero dos ejes de coordenadas. En el eje de abscisas (eje X), se trazan los calados del buque y en el eje de ordenadas (eje Y), las alturas de los metacentros (KM) y de los centros de carena (KC). Una vez representado, se observa que a medida que aumenta el calado, disminuye KM, siendo más rápida esta disminución cuando el buque está en lastre y más lenta cuando el buque se encuentra en un desplazamiento cerca del de máxima carga. [22]

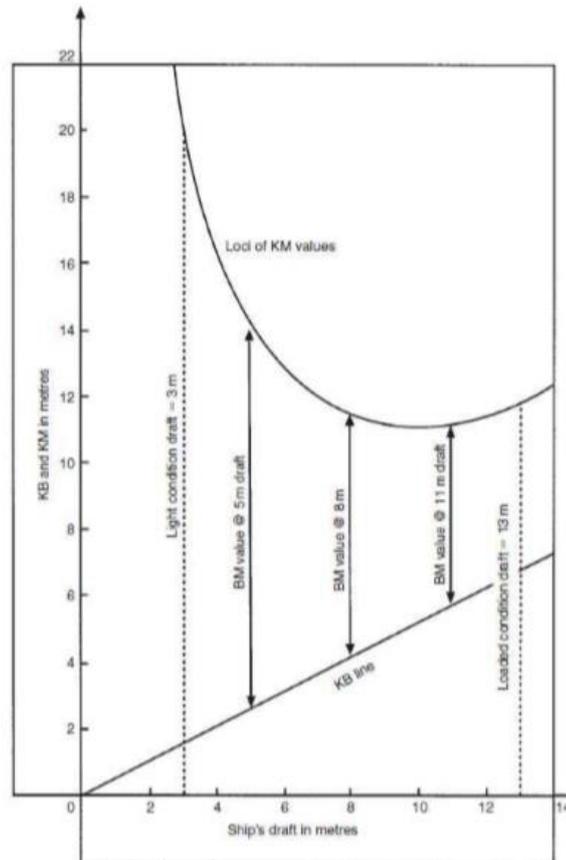


Figura 2. Diagrama metacéntrico transversal [22]

Ya se ha hablado de cuál es la condición de equilibrio con el buque adrizado, pero ahora trataremos los dos casos por los que esta situación de equilibrio puede variar y no tenerla cuando esté adrizado. Un buque puede tomar escoras por dos causas, por traslados de pesos a bordo o por causas externas (mar, viento...). [22]

-Escora producida por el traslado transversal de un peso a bordo

Un buque inicialmente en equilibrio, adrizado, en la flotación F_0L_0 . Trasladamos un peso p , desde g hasta g' . El centro de gravedad del buque se traslada desde G hasta G_2 , mientras que el centro de carena se traslada desde C_0 hasta C_1 . El buque adquiere la escora θ y queda en equilibrio en la flotación F_1L_1 , estando el peso del buque aplicado en G_2 y el empuje en C_1 .

-Escora producida por efecto de una causa externa

Un buque inicialmente en equilibrio, adrizado, en la flotación F_0L_0 . Por una causa externa (mar, viento...) el buque se inclina transversalmente, tomando la flotación F_1L_1 . El centro de carena inicial C_0 se traslada hasta C_1 siguiendo la curva "C" proyección; mientras que el centro de gravedad G no varía su posición. El empuje E se aplica en la nueva línea de empuje en C_1 y el peso del buque se aplica en G , paralelamente a la nueva línea de empuje. De aquí surge el par de fuerzas GZ o par de estabilidad estática transversal, al no estar el centro de empuje y gravedad en el mismo punto. [22]

Existen varias clases de equilibrios, y depende de la posición relativa del centro de gravedad y el metacentro. El primer tipo de equilibrio es el estable, donde el metacentro está por encima del centro de gravedad, con lo que se origina un par adrizante. El segundo tipo de equilibrio es el inestable, donde el metacentro está situado por debajo del centro de gravedad, originándose un par escorante. Para esta situación la OMI prohíbe salir a navegar al buque por tener la altura metacéntrica negativa. Y por último, el equilibrio indiferente, donde el metacentro coincide con el centro de gravedad. En esta situación no hay par de fuerzas, ni adrizantes ni escorantes, por lo que el buque queda escorado sin recuperar su posición inicial. [22]

También existe otra forma de analizar el equilibrio del buque, y es analizando los períodos de balance. Éste es el tiempo en segundos que tarda un buque en ir desde que se encuentra inclinado a una banda, hasta que lo está a la otra el mismo número de grados. El parámetro a analizar para conocer el período de balance es el GM , donde un GM pequeño le corresponde balances lentos, mientras que un GM grande le corresponde balances rápidos. De aquí también se origina la denominación de buque "duro" y buque "blando". Un buque blando es aquel que tiene un GM pequeño, lo que produce un período de balance grande, o períodos lentos, diciéndose que el buque se "duerme". El brazo GZ es pequeño, por lo que tienen poca estabilidad. Los buques "duros" son los que tienen el GM grande, lo que trae como consecuencia un período de balance pequeño y rápido. El brazo GZ también es grande, por lo que tiene exceso de estabilidad. [22]

4.2 Evolución de los cálculos de estabilidad

Hace no muchos años, todos los cálculos que se realizaban a bordo, se tenían que realizar a mano, ya fuesen de consumos de la máquina, cálculos de posicionamiento, y como no también de la estabilidad del buque. En el caso de los cálculos de estabilidad a bordo, no solo era el hallar las coordenadas del centro de gravedad del buque, si no a continuación, tener que trazar a mano las gráficas de GZ y el diagrama metacéntrico. Para poder hallar todos estos datos para su posterior estudio, primero se debían sondear todos los tanques, ya fuesen de lastre o de combustible manualmente, con el tiempo que eso podía conllevar al oficial. Dependiendo del tipo de buque que fuese, dichos cálculos podían ser más o menos largos, ya que para un petrolero se tendría una única coordenada del tanque, mientras que para un portacontenedores se tendría que ir calculando las coordenadas de cada contenedor en el cálculo de estabilidad.

Por ello la evolución en el mundo informático y la llegada de distintos programas de software especializados en los cálculos de la estabilidad de los buques ha ayudado en la rapidez y fluidez de las cargas de los buques. Hoy día, tal vez existan unas cuantas decenas de programas especializados en esta labor.

Apoyándonos en el libro “Ship Stability” de la editorial DOKMAR [24], hacemos una introducción a cómo funcionan los programas de estabilidad. Los cálculos de estabilidad se pueden efectuar manualmente como se ha hecho siempre, pero suponen una inversión de tiempo y se debe tener una gran comprensión de los conocimientos relacionados con la estabilidad, para que no sean susceptibles de errores metódicos como numéricos en los cálculos, aunque este hecho es cierto que se tiende a disminuir a medida que aumenta la experiencia de la persona cualificada que los desarrolla.

La complejidad de los cálculos siempre ha estado ahí, por eso desde que se ha evolucionado en el mundo informático se ha buscado desarrollar programas que ayuden en el cálculo y la evaluación de la estabilidad. En general, este tipo de software se denomina "software de carga" o "software de estabilidad”.

Sin embargo, la primera aplicación de un equipo de carga no estaba enfocada para el cálculo de la estabilidad, sino para el cálculo de la resistencia longitudinal. Después de todo, aunque suponga una inversión de tiempo, la estabilidad se puede calcular manualmente, pero es más complejo hacerlo para la resistencia longitudinal, por lo que el desarrollo de los programas de estabilidad que se conocen hoy en día están integrados con los cálculos de la resistencia.

Es por eso que por lo que las sociedades de clasificación desde los años setenta han establecido la obligatoriedad de software de carga de los buques de la fuerza crítica para el cálculo y la evaluación de las características de resistencia longitudinal.

El propósito del software de carga es el cálculo de las cuestiones relacionadas con la seguridad y la carga del buque, tales como la estabilidad sin avería, la fuerza longitudinal, línea de visión y estabilidad con avería.

Los programas se pueden dividir según su base aritmética, distinguiendo entre programas que imitan el proceso del cálculo manual o los que calculan directamente la estabilidad.

Con el fin de entender esta distinción, uno tiene que darse cuenta de que la práctica de calcular la estabilidad se ha adaptado ligeramente a la limitación humana.

Todos los datos que se necesitan para dichos cálculos se encuentran tabuladas en una serie de tablas, pero este tipo de tablas también tienen que ser producidas, lo cual es una gran cantidad de cálculos, que por lo general se ejecuta por el diseñador de la nave o el astillero.

Sus resultados, que se dan en forma de tabla o gráfica, se pueden usar luego para la ejecución de un cálculo de la estabilidad de una carga real.

Sin embargo, cuando todos los cálculos ya están dentro de un ordenador directamente, esta división entre "trabajo preliminar" y "obra final" ya no es necesaria, por lo que el ordenador puede ejecutar todo el proceso de los cálculos de estabilidad de una sola vez, sin la etapa intermedia de las tablas y los gráficos.

Por lo tanto, han surgido dos tipos de programas de carga y estabilidad:

- Funcionamiento en modo indirecto, es decir, con la ayuda de datos hidrostáticos previamente definidos, como tablas hidrostáticas, curvas cruzadas y curvas Bonjean. Así sería el procedimiento que desarrollaría una persona.

- Funcionamiento en una base directa, lo que implica que un programa de este tipo dispone de un modelo geométrico completo de la forma del casco y compartimentos, con la ayuda de los cuales la estabilidad se calcula directamente. Esto también se llama el "enfoque de los primeros principios" (porque aquí, sin la simplificación o la desviación, se aplican los mecanismos básicos de la física).

Dentro de esta clasificación de los programas de estabilidad, también hay que destacar la forma de cada uno de hallar una determinada situación de estabilidad con avería.

- Con los cálculos de estabilidad con avería determinada se calcula para un número de casos estándar de daños, lo que se obtiene un borrador final, el asiento y la estabilidad del buque con avería. Se requiere un análisis completo de estabilidad de daño a ese fin, que por lo general, sólo se puede ejecutar con el software basado en el cálculo directo. Lo mismo se aplica a la evaluación de un daño real (por ejemplo, para investigar lo que podría ser una acción correctiva en el caso de los daños reales a la nave).

- Con el cálculo probabilístico se determina la capacidad de supervivencia en caso de daños, comenzando previamente por determinar un centro vertical de gravedad. Para que se le considere capacidad de supervivencia suficiente, se debe dar la condición de que el centro de gravedad real no esté por encima de ese valor asumido. Cualquier programa de carga, independientemente de su categoría, puede estar provisto de una limitación del centro de gravedad y por lo tanto el programa también tiene en cuenta aspectos de estabilidad de averías. Sin embargo, una disposición de este tipo, aparte de su utilidad, no puede ser llamado un cálculo de estabilidad con avería real.

Hasta ahora se ha nombrado la cuestión de cómo, a partir de la carga real, se pueden calcular los aspectos de estabilidad y resistencia. Pero los equipos de carga que se

precien hoy en día disponen de una serie de herramientas que simplifican su uso. Tales herramientas se pueden subdividir en dos categorías:

- Herramientas de carga
- Evaluación de la carga de acuerdo con las regulaciones adicionales

En esencia, la carga de un buque no es más que una lista de los pesos a embarcar o desembarcar del buque. En la práctica, sin embargo, es bastante difícil trabajar con una lista, en particular cuando el número de elementos a embarcar es grande (lo que sería, por ejemplo, meter todos los contenedores de un buque de 8000 TEU manualmente). En beneficio de conseguir un procedimiento simple, se han desarrollado una serie de herramientas de carga, que se implementan a menudo gráficamente con el fin de obtener una retroalimentación visual adecuada, lo que reduce la posibilidad de errores. Algunas herramientas utilizadas a menudo son:

- Enlaces a los sistemas de medición de tanques, donde las sondas de los tanques aparecen directamente en el software de carga del ordenador.
- Herramientas para la carga de contenedores, que pueden variar desde una simple (por ejemplo, sólo pueden manejar contenedores estándar) a una más completa, donde el ordenador puede usar contenedores de diferentes medidas, con todo tipo de anchuras y alturas, posiblemente también posicionados transversalmente, incluyendo un control sobre el grado de realidad de una determinada pila (por ejemplo, que un contenedor sólo se puede colocar cuando ya hay uno debajo).
- Herramientas para la grúa de carga, posiblemente de más de una grúa, a lo mejor para una operación vinculada con dos grúas.
- Herramientas para varias clases específicas de carga, como carga general, RoRo y de carga de grano.

A la hora de realizar la estiba de un buque, hay que tener en cuenta unas series de normas de seguridad y cumplir una serie de requisitos establecidos por la legislación. Al enumerar los aspectos de seguridad que se han incluido en la legislación, se suele limitar a las cuestiones convencionales de estabilidad en avería y resistencia longitudinal. Pero de acuerdo con la legislación, la carga también puede tener que

cumplir con otros criterios, y el software de carga podría comprometer el comportamiento del buque en la mar y poner a prueba dicha estiba, ya que en la mayoría de los programas de estabilidad, no se pueden introducir determinados parámetros que provocando por ejemplo, una superación de los momentos de torsión (por ejemplo, en los buques con grandes aberturas en la cubierta, como buques portacontenedores). También puede poner en entredicho el cumplimiento del criterio de la línea de visión, que prescribe que debe haber un cierto grado de visibilidad hacia delante desde el puente de navegación. También existe un reglamento para el posicionamiento y agrupación de mercancías peligrosas (código IMDG).

Deberá tenerse en cuenta que la Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación (IACS) ha emitido nuevas prescripciones unificadas, UR L5. Para los buques contratados después de julio de 2005, hay tres tipos de criterios de estabilidad que prevalecen en los cálculos:

1. Estabilidad sin avería
2. Estabilidad sin avería con comprobación de la estabilidad con avería y curva límite de KG
3. Estabilidad con avería

Cuando un buque es equipado con un software de carga, una parte de la evaluación de la seguridad se le deja al programa. Dicho programa, por tanto, tiene que ser revisado a fondo antes de que realmente se pueda utilizar. Es por eso que las sociedades de clasificación hacen exigencias en el rendimiento y el funcionamiento del software de carga.

En general, existen dos enfoques que son usados para certificar los programas:

- Algunas sociedades de clasificación (como Germanischer Lloyd) tienen un procedimiento de homologación de tipo genérico para el software de carga. Para que el software de propósito de carga pueda ser desarrollado y suministrado para uno o varios buques, la sociedad de clasificación investiga este software de carga y comprueba si los resultados de sus cálculos y funcionamiento son correctos (por lo

menos están dentro de los márgenes dados). Cuando está todo correcto, la sociedad emite un certificado de idoneidad para este software de carga.

Una vez realizado el estudio anterior, el software de carga del buque se pone a prueba una vez más, sobre todo para investigar si todos los datos que son específicos para la nave han sido introducidos correctamente, y si los resultados son fieles al libro de estabilidad aprobado.

- Otras sociedades (como Bureau Veritas o Det Norske Veritas) no tienen un procedimiento de homologación y evalúan cada programa de carga de forma individual.

Las sociedades de clasificación no sólo evalúan los resultados de los cálculos del software de carga, sino que también tienen opinión sobre el diseño, la interfaz de usuario y las facilidades de presentación, y por lo tanto están haciendo peticiones sobre el mismo durante su desarrollo.

En cuanto a las normas generales o directrices que el software de carga tiene que cumplir, las sociedades de clasificación pueden tener sus propias directrices, aunque desde el año 2005, la Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación (IACS) ha publicado la guía de Requisitos para las computadoras abordo para los cálculos de estabilidad, por el cual se ha conseguido una cierta unificación.

También existe la norma ISO 16155 (a bordo de buques de carga) donde se recogen y clasifican los instrumentos internacionales estándar entre tres tipos de funciones de carga:

- Las funciones de la categoría A, diseñados y destinados para los cálculos estándar, que también se pueden hacer por medio del libro tradicional estabilidad. Programas que sólo soportan esta categoría de cálculos pueden basarse en un método de cálculo indirecto.

- Las funciones de la categoría B, destinados y adecuados para los cálculos que van más allá de los de la libreta de estabilidad. Programas que disponen de las funciones de esta categoría, tienen que basarse, según este estándar ISO, en un cálculo directo.

- Funciones de la categoría C, que están apoyando, como herramientas de carga.

El hardware en el que se ejecuta el programa tiene que cumplir con ciertas regulaciones. En general se requiere que el hardware sea resistente, en cierta medida, contra el efecto adverso que puede ocurrir en un puente de navegación, tales como la humedad, las vibraciones y las fluctuaciones de temperatura. Además debe estar bien anclado para evitar posibles deslizamientos y caídas que produzcan la rotura del aparato.

El hardware resistente contra tales efectos se llama "marinized", pero debido a que dichos ordenadores son convencionales, se aplica el llamado "kit mariner", especial para alcanzar el nivel requerido de resistencia.

Además, hay otra alternativa que debe ser mencionado y que es una hoja de cálculo como una herramienta para los cálculos de estabilidad. Aunque no es un programa real, posee la ventaja de que se puede adaptar totalmente a los deseos de cualquier usuario individual.

4.2.1 Programas de estabilidad

Algunos ejemplos de programas de estabilidad son el Easeacon de Marine Alignments [25]. Según aparece en su web:

Easeacon es algo más que una herramienta de planificación para el cálculo de la resistencia estructural y la estabilidad del buque. Easeacon es también una herramienta útil para el manejo, la gestión y la planificación de cualquier buque de carga, destinado especialmente al personal especializado en el sector como son los planificadores de buques, estibadores y los oficiales de a bordo.

Easeacon está disponible con dos filosofías de cálculo básicamente diferentes, una con el uso de las bases de datos tabulares, y otro basado en el método de estimación directa.

- El uso de las bases de datos tabulares ha sido la vida de todos los instrumentos de carga durante décadas. Da una pieza rápida, fiable y razonablemente precisa de software a precios muy competitivos.
- Con la introducción de los métodos directos, el software es capaz de calcular con precisión todos los datos de estabilidad y equilibrio de la nave con una escora, por ejemplo, una condición dañada.

Con una exigencia cada vez mayor en el mercado de los sistemas que pueden conectarse el uno al otro, Easeacon puede ser configurado para interconectarse con casi cualquier otro sistema y recopila información de ambas bases de datos totalmente integrados y externos.

Los programas tienen enlaces a los códigos IMDG, guías de segregación de estiba, tablas ASTM, lo que permiten a Easeacon evaluar con precisión cualquier situación de carga, lo que permite incluso la toma de decisiones a última hora.

Easeacon incluye un sistema de interfaces de medición de los niveles del tanque, sistemas de proyectos de medición y sistemas de comunicación, ampliando el concepto de la calidad de un equipo de carga.

Con un módulo de prueba de estabilidad integrada, Easeacon puede calcular el verdadero VCG del buque y de este modo el margen de estabilidad real antes de salir de puerto. La lectura de datos desde el sistema anti-escora o inclinómetro se realizan automáticamente. Alternativamente, el cambio de datos de pesos se puede introducir manualmente, si ninguna interfaz puede ser proporcionada a bordo.

Pero eso no es todo, Easeacon es también el centro de información natural, ya que realiza de manera continua un seguimiento de la planificación, así como del cálculo de la fuerza y la estabilidad. Easeacon recoge todos los datos relevantes para la generación de los informes requeridos en sus operaciones del día a día. Easeacon soporta impresión, fax y e-mail.

El desarrollo continuo y la actualización asegura de que usted con Easeacon siempre tiene un líder del mercado a bordo. [25]

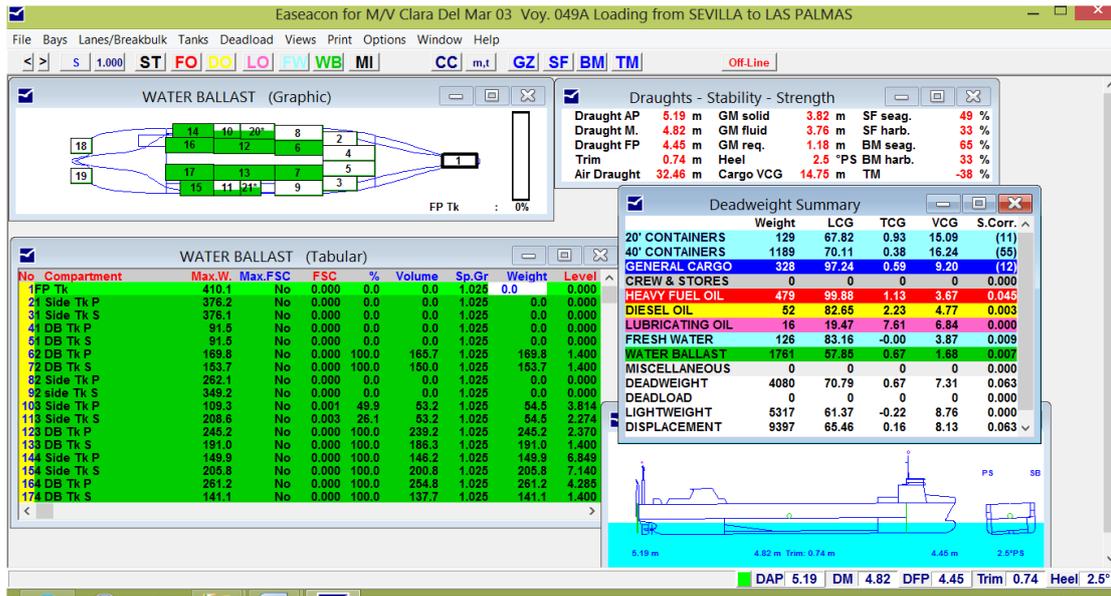


Imagen 6. Captura de pantalla Easeacon (Elaboración propia)

En el mercado también encontramos el programa de Kockum Sonics, Loadmaster X5.

Según escriben en la web [26] de Kockum Sonics, “El programa básico cubre todas las necesidades en cuanto a resistencia longitudinal y asegura que su condición cumple con todas las regulaciones y normativa de la estabilidad sin avería. Con el programa el oficial puede planificar la carga y descarga de un modo más gráfico. La descripción y modificación de la secuencia de carga es rápida y fácil. Los niveles de los tanques se mueven con el ratón al igual que el añadido y borrado de la zona de trabajo mediante las funciones de arrastrar y soltar. Se pueden hacer cálculos una y otra vez hasta que se encuentre la carga óptima. Los informes y órdenes de trabajo son generados fácilmente. La opción de simulación reduce drásticamente a su vez las labores realizadas en el puerto. Una inversión con el tiempo de amortización calculada en horas.

Dispone de conexión en línea automática para el sistema de medición de los tanques y le da al operador el control total del flujo de carga, el lastre y el combustible. El equipo de carga puede hacer sonar la alarma predefinida previamente. El flujo puede ser controlado para cada tanque o por el tipo de carga. También dispone de alarmas para los calados, el asiento y la escora, pudiendo ser predefinidos previamente.

El programa básico cubre toda la información necesaria. El registro de la bomba maneja la secuencia del bombeo. Se registrarán Cambio, cantidad y fecha / hora. Numerosos informes están disponibles en función del buque. Por ejemplo, informe de averías, informe de estabilidad, resistencia e informe de carga.

Como opciones adicionales, el programa puede hacer el cálculo directo de la estabilidad con avería y calcula una condición de avería en un segundo, permitiendo que el barco que va a cargar con la máxima cantidad de carga cumpla de acuerdo con los criterios de la OMI y la IACS UR L5.”

Otro programa más relacionado con el sector es el CPC 2.0, perteneciente a Hydrographic and Marine Consultants B.V. (HMC BV). HMC BV es una organización de ingeniería y consultoría independiente y ofrece transporte e ingeniería de instalación en alta mar y es reconocido proveedor de instrumentos de carga de buques, sistemas de seguridad, y sistemas de monitorización del casco. [27]

Este programa lo presentan en su web [28] como:

“CPC 2.0 es la solución de HMC para las operaciones de carga de barcos aprobado por distintas entidades del sector. Este programa de carga combina todos los parámetros de estabilidad y resistencia obligatorios de análisis con una interfaz amigable y eficiente para el usuario. Aspecto clave en el desarrollo del CPC 2.0 fue disminuir la necesidad de tener un conocimiento experto para operar el programa gracias a la renovación de la interfaz y rediseñar el aspecto visual.

Basándose en su experiencia pasada, HMC desarrolló CPC 2.0 como una solución rentable para cumplir con los requisitos de estabilidad y seguridad de la OMI.

CPC 2.0 se basa en el CPC 1.9, que fue instalado en más de 1.500 barcos de todo el mundo desde su primera entrega en 1970. En ese momento fue uno de los primeros ordenadores de carga de barcos disponibles para una amplia gama de buques. Durante los últimos 40 años, el programa se ha desarrollado y ampliado para cubrir una mayor variedad de necesidades que dieron lugar a una extensa lista de funciones disponibles.

CPC 2.0 está basado en el servidor, lo que permite el intercambio de todos los datos almacenados en la oficina o en el servidor de la nave. CPC 2.0 es totalmente compatible con Windows XP, Vista y Windows 7.”

Estas son las características estándar disponibles en CPC 2.0:

- Basado en un servidor informático de carga de buques
- Entrada de carga a granel
- Entrada de carga de hasta 1.000 TEU (más de 1.000 TEU el módulo está disponible bajo petición)
- Las aguas de lastre y de entrada del tanque de consumibles
- Proyecto, detalles y lista de cálculo
- Cálculo de la estabilidad y la fuerza cortante

La siguiente lista se trata de los módulos opcionales que están disponibles:

- BAPLIE (es el mensaje EDI (intercambio electrónico de datos) que sirve para transmitir la planificación de la carga de las bahías de los barcos portacontenedores entre la Terminal Portuaria y la Naviera [29])
- El cumplimiento de código IMDG
- Módulo de Ro-Ro
- Acumulación de hielo
- Cálculo de la estabilidad en avería (pérdida de flotabilidad)
- Proyecto Online
- Sistema de reservas de contenedores
- La segregación de cargas de mercancías peligrosas
- Colocación de mamparos
- Cálculo de la inmersión de la hélice

A continuación se pueden ver unas capturas de pantallas disponibles en la página web de Hydrographic and Marine Consultants B.V. (HMC BV):

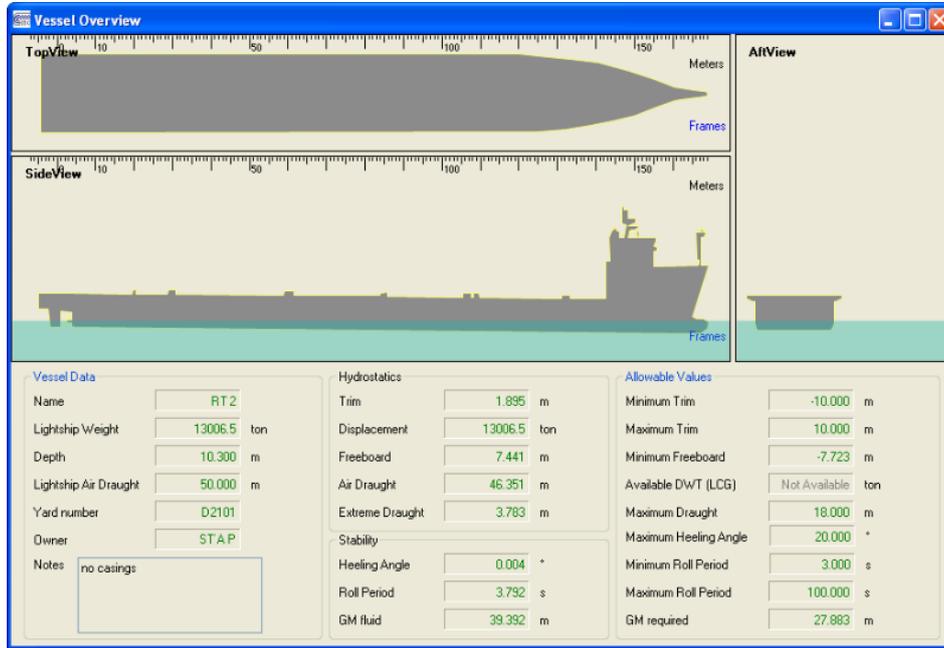


Imagen 7. Captura pantalla programa CPC 2.0 [30]

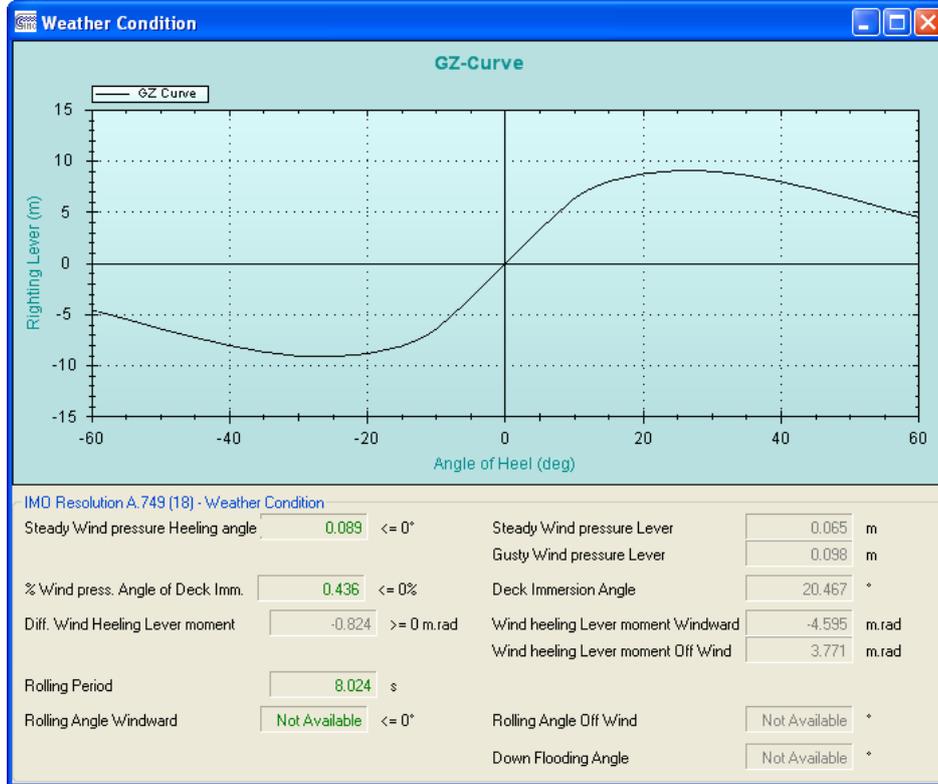


Imagen 8. Captura de pantalla programa CPC 2.0 [30]

4.3 Criterios de estabilidad

Después de hacer un repaso histórico de cómo ha ido evolucionando el estudio de la estabilidad y conocer los conceptos más importantes de ésta y sus programas de cálculos, en algún apartado se ha hablado de normas y criterios que deben seguir los buques. Reciben el nombre de criterios de estabilidad las normas dadas sobre los valores de la estabilidad estática y dinámica de los buques en sus peores condiciones de operatividad. Estos criterios normalmente van avalados por la estadística y por la investigación en canales de experiencia. Por tanto, los criterios de estabilidad son el conjunto de normas que debe cumplir un buque para que su estabilidad alcance valores mínimos que garanticen su seguridad.

Estos criterios pueden clasificarse según los parámetros que controlan en:

- Criterios en función de la altura metacéntrica.
- Criterios en función de la estabilidad estática.
- Criterios en función de la estabilidad estática y dinámica.
- Criterios en función de la estabilidad estática y la acción del viento.
- Criterios en función del período y amplitud del balance.

Existen también diferentes criterios creados para distintos tipos y tamaños de embarcaciones, dado que es muy amplia la variedad de buques y muy difícil que un solo criterio pueda ser aplicado de forma universal.

Alberto Francescutto en la memoria “El desarrollo de los criterios de estabilidad del buque a la luz de los progresos de la arquitectura naval” [31] divide el desarrollo de los criterios de estabilidad en tres períodos, primero una fase inicial de desarrollo de Criterios de Estabilidad a nivel internacional, que comienza a principios 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 Resolución A.749 y su lenta evolución hasta el 2001; luego continuó con la reestructuración del Código de Estabilidad para todos los buques cubiertos por los instrumentos de la OMI al final de este proceso en 2007; y por último del principio

del desarrollo de los criterios de la segunda generación (PBC - Performance Based Criteria) a hoy, incluidos los previsible desarrollos futuros.

Las normativas de estabilidad, sea a buque sin avería o en inundación, sólo han sido formuladas recientemente. Este hecho es particularmente para las normativas formuladas a nivel internacional que han sido formuladas mucho tiempo después por la misma institución de la OMI. Las primeras de ellas han nacido, en efecto, de una recomendación contenida en las conclusiones de la Conferencia de 1960 de la Convención SOLAS. 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 superior. 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.

Como resultado de los estudios realizados por la OMI y otras organizaciones el Criterio General o "Estadístico" fue formulado y adoptado en 1968 (Res. A.167 de la OMI). El contiene estándares mínimos para la altura metacéntrica inicial y algunas características de la curva de los brazos de estabilidad estática y la estabilidad dinámica. Para los buques de pasaje también son previstos estándares de estabilidad, como puede ser la escora debida a una maniobra de giro y la aglomeración de pasajeros en una misma banda. 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.

En la conclusión del SOLAS de 1974, se ve como se dejaba la puerta abierta a una evolución continua de estos estudios: "[OMI] recomienda que se tomen medidas para formular mejores normas internacionales en materia de estabilidad sin avería de los buques, teniendo en cuenta, entre otras cosas, las fuerzas externas que afectan a los barcos en mar encrespada que puede llevar a la zozobra o para ángulos de escora inaceptables."

Como resultado, apareció el Criterio Meteorológico (Criterio de viento y balance intensos) que fue adoptado por la OMI en 1985 (Res. A. 562). En realidad, ello consta de un Criterio del Viento, cuya formulación ha sido revisada y se ha vuelto menos ambigua en el Código Internacional de Estabilidad sin Avería del 2008, y de un Criterio de Viento y Olas. En este último, el ángulo de balanceo estacionario ϕ bajo la acción de las olas es calculado con una fórmula.

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 la mar. Recordamos que los dos Criterios principales tuvieron que ser aplicados ambos aunque quedando a nivel OMI de "recomendaciones".

Desde un punto de vista general, los dos Criterios son 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 el cual trata de es de no superar el ángulo crítico ϕ .

El segundo ciclo que define Alberto Francescutto comienza en 2001, cuando es iniciado el proceso de revisión de los 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. Inicialmente la revisión fue limitada al Criterio Meteorológico, pero el proceso se ha

extendido al Código entero con la idea de realizar 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 concluyó en el 2007 con los siguientes resultados:

- Reestructuración del “Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008” y MSC.1/Circ. 1281, devolviendo al mismo tiempo una parte obligatoria bajo el paraguas del SOLAS. Aunque siendo una recomendación a nivel de OMI, muchas partes del Código tuvieron todavía carácter obligatorio. 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.
- Se ha por tanto distinguido la Parte A – Criterios Obligatorios de la Parte B - Criterios recomendados de proyecto para determinados tipos de buques;
- Desarrollo de un procedimiento alternativo para 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;

Y en 2007 comenzaría el tercer período en el que el autor del documento divide la evolución de los criterios de estabilidad. El nuevo “Código Internacional de Estabilidad sin Avería, 2008” fue adoptado por el Comité de la Seguridad Marítima de la OMI.

“En éste código elaboraron criterios para ciertos tipos de buques y elaboraron la idea 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). 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 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 primer 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 elaboraron 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 aquel modo y va sometido 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 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 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 Capitán a reducir al mínimo posible el nivel de riesgo. Los resultados de la aplicación del DSA además proveerán informaciones sobre el nivel de seguridad conexo.

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, fuerza de propulsión y 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.” [31]

Tomando la conclusión del trabajo de Alberto Francescutto “El desarrollo de los criterios de estabilidad del buque a la luz de los progresos de la arquitectura naval”, comenta que el desarrollo de los criterios de estabilidad desde su revisión en 2001 el progreso ha sido muy rápido, en mayor medida debido a la mayor conciencia de los peligros y el desarrollo y avance tecnológico que ha habido gracias a los congresos que se celebran sobre la estabilidad todos los años.

4.3.1 Criterio general de estabilidad de la OMI

El criterio general de estabilidad de la OMI se recoge en la Res. A.749, y fue actualizada en el “Código de Estabilidad sin Avería, 2008”. En España el Código se recoge en el Boletín Oficial del Estado, y comienza con el preámbulo, donde se explica los objetivos para el que fue creado el Código, los datos y conocimientos en los que está basado, los avances que contiene respecto a la edición anterior y a quién va dirigido.

“PREÁMBULO

1. *El presente código ha sido elaborado con objeto de ofrecer en un solo documento las disposiciones obligatorias de la Introducción y la parte A, junto con las disposiciones recomendadas de la parte B sobre estabilidad sin avería, basadas primordialmente en los actuales instrumentos de la OMI. En los casos en que las recomendaciones del presente código difieran aparentemente de las de otros códigos de la OMI, prevalecerá lo dispuesto en dichos códigos. A fin de que sea lo más completo posible y para conveniencia del usuario, el presente código incluye también disposiciones que proceden de instrumentos obligatorios de la OMI.*

2. *El presente código está inspirado en los conceptos más recientes del sector disponibles en el momento de su elaboración, teniendo en cuenta sólidos principios de proyecto e ingeniería y la experiencia adquirida en la explotación de estos buques. Por otra parte, la técnica de proyecto de los buques modernos evoluciona con rapidez, por lo que el código, en lugar de permanecer estático, debería ser objeto de la evaluación y revisión necesarias. Con tal finalidad, la Organización examinará regularmente el presente código teniendo presentes tanto la experiencia como las innovaciones que se produzcan.*

3. *Se tuvieron en cuenta una serie de fenómenos, tales como la condición de buque apagado, la acción del viento en buques con mucha superficie expuesta, las características de balance, mala mar, etc., basados en la tecnología más avanzada y en los conocimientos más recientes del sector en el momento en que se elaboraba el presente código.*

4. *Se ha reconocido que, dada la gran variedad de tipos y tamaños de los buques, así como la diversidad de condiciones operacionales y ambientales, no era posible resolver de manera general todos los problemas de seguridad que desde el punto de vista de la estabilidad se plantean para impedir los accidentes. En particular, la seguridad del buque en mar encrespada encierra fenómenos hidrodinámicos complejos que hasta el momento no se han investigado y comprendido adecuadamente. El buque en mar encrespada ha de concebirse como un sistema dinámico en el que las relaciones que se establecen entre el propio buque y las*

condiciones ambientales, como por ejemplo la influencia del oleaje y el viento, constituyen elementos sumamente importantes. La elaboración de criterios de estabilidad basados en aspectos hidrodinámicos y en el análisis de la estabilidad del buque en mar encrespada plantea complejos problemas que será preciso continuar investigando.” [32]

Según comienza el Código explica su finalidad, *“La finalidad del presente código es proporcionar criterios de estabilidad, tanto de carácter obligatorio como de recomendación, y otras medidas que garanticen la seguridad operacional de todos los buques a fin de reducir al mínimo los riesgos para los mismos, el personal de a bordo y el medio ambiente. En esta Introducción y en la parte A del presente código se recogen los criterios obligatorios, mientras que la parte B incluye las recomendaciones y otras directrices.”*[32] Dentro de este punto también expone específicamente hacia qué tipos de buques va dirigido éste Código y hace una reseña a que las Administraciones puede imponer resoluciones en cuanto a buques innovadores que no estuviesen recogidos dentro de esta lista: *“Salvo indicación en otro sentido, el presente código contiene criterios de estabilidad sin avería para los siguientes tipos de buques y otros vehículos marinos de eslora igual o superior a 24 m:*

- .1 buques de carga;*
- .2 buques de carga que transporten cubiertas de madera;*
- .3 buques de pasaje;*
- .4 buques pesqueros;*
- .5 buques para fines especiales;*
- .6 buques de suministro mar adentro;*
- .7 unidades móviles de perforación mar adentro;*
- .8 pontones; y*

.9 buques de carga que transporten contenedores en cubierta y buques portacontenedores.” [32]

A continuación comienzan los criterios obligatorios en la Parte A, con unas cuestiones generales que incluyen un conjunto de prescripciones mínimas que se aplicarán a los buques de carga y a los buques de pasaje de eslora igual o superior a 24 m. En el caso de los buques portacontenedores de eslora igual o superior a 100 m, podrán aplicarse las disposiciones de la parte B como alternativa a lo dispuesto en la parte A. Los buques de suministro mar adentro y los buques para fines especiales no están obligados a cumplir lo dispuesto en la parte A. En el caso de los buques de suministro mar adentro, podrán aplicarse las disposiciones de la parte B como alternativa a lo dispuesto en esta parte. En el caso de los buques para fines especiales, podrán aplicarse las disposiciones de la parte B como alternativa a lo dispuesto en esta parte. Dentro de las cuestiones generales de la Parte A también explica que cualquier complemento al cuadernillo de estabilidad del buque que ayude al cálculo de ésta, debe ser aprobado previamente por la administración.

Continuando dentro del mismo apartado nos encontramos con dos divisiones de los criterios que deben cumplir, el criterio referido a las propiedades de la curva de brazos adrizantes, y el criterio meteorológico. En los Criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes, *“El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no será inferior a 0,055 metro-radián hasta un ángulo de escora $\theta = 30$ ni inferior a 0,09 metro-radián hasta $\theta = 40$, o hasta el ángulo de inundación descendente θ si éste es inferior a 40° . Además, el área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) entre los ángulos de escora de 30° y 40° , o entre 30° y f si este ángulo es inferior a 40° , no será inferior a 0,03 metro-radián. El brazo adrizante GZ será como mínimo de 0,2 m a un ángulo de escora igual o superior a 30° . El brazo adrizante máximo corresponderá a un ángulo de escora no inferior a 25° . Si esto no es posible, podrán aplicarse, a reserva de lo que apruebe la Administración, criterios basados en un nivel de seguridad equivalente. La altura metacéntrica inicial GM_0 no será inferior a 0,15 m.”[32]*

En el criterio de viento y balances intensos o criterio meteorológico “habrá que demostrar la aptitud del buque para resistir los efectos combinados del viento de través y del balance, con referencia a la figura 2.3.1, del modo siguiente:

.1 se someterá el buque a la presión de un viento constante que actúe perpendicularmente al plano de crujía, lo que dará como resultado el correspondiente brazo escorante (lw_1);

.2 se supondrá que a partir del ángulo de equilibrio resultante (0), el buque se balancea por la acción de las olas hasta alcanzar un ángulo de balance (1) a barlovento. El ángulo de escora provocado por un viento constante (0) no deberá ser superior a 16° o al 80 % del ángulo de inmersión del borde de la cubierta, si este ángulo es menor;

.3 a continuación se someterá al buque a la presión de una ráfaga de viento que dará como resultado el correspondiente brazo escorante (lw_2); y

.4 en estas circunstancias, el área b debe ser igual o superior al área a, como se indica en la figura 2.3.1 infra:

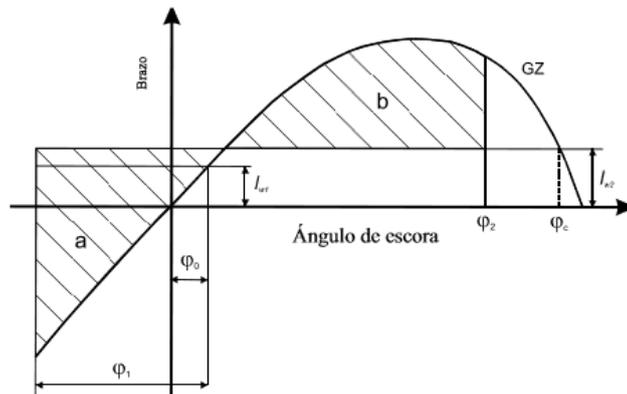


Figura 2.3.1: Viento y balance intensos

Figura 3. Curva del par de estabilidad estática transversal [32]

donde los ángulos de la figura 2.3.1 se definen del modo siguiente:

θ_0 = ángulo de escora provocado por un viento constante

θ_1 = ángulo de balance a barlovento debido a la acción de las olas

θ_2 = ángulo de inundación descendente (θ_f), o 50, o θ_c , tomando de estos valores el menor, siendo:

θ_f = ángulo de escora al que se sumergen las aberturas del casco, superestructuras o casetas que no puedan cerrarse de modo estanco a la intemperie. Al aplicar este criterio no hará falta considerar abiertas las pequeñas aberturas por las que no pueda producirse inundación progresiva

θ_c = ángulo de la segunda intersección entre la curva de brazos escorantes lw_2 y la de brazos GZ.

Los brazos escorantes lw_1 y lw_2 provocados por el viento, a que se hace referencia en 2.3.1.1 y 2.3.1.3, son valores constantes a todos los ángulos de inclinación y se calcularán del modo siguiente:

$$l_{w_1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot g \cdot \Delta} \quad (m)$$

$$l_{w_2} = 1,5 \cdot l_{w_1} \quad (m)$$

donde:

P = presión del viento de 504 Pa. El valor de P utilizado para los buques en servicio restringido podrá reducirse a reserva de que lo apruebe la Administración

A = área lateral proyectada de la parte del buque y de la cubertada que quede por encima de la flotación (m^2)

g = aceleración debida a la gravedad de 9,81 m/s^2 . "[32]

Si la Administración los considera satisfactorios, podrán aceptarse otros medios para determinar el brazo escorante (lw_1) como alternativa. Cuando se realicen dichas pruebas alternativas, se hará referencia a las Directrices elaboradas por la Organización. La velocidad del viento utilizada en las pruebas será igual a 26 m/s en

tamaño natural con un perfil de la velocidad uniforme. El valor de la velocidad del viento utilizado para los buques en servicios restringidos podrá reducirse a un valor que la Administración considere satisfactorio. [32]

La parte A del “Código de estabilidad sin avería, 2008” finaliza con una serie de particularidades para cada tipo de buque, y ofrece también un criterio de estabilidad alternativo para buques madereros. *“En los buques que transporten cubiertas de madera, y siempre que la cubierta se extienda longitudinalmente entre las superestructuras (cuando no haya superestructura que constituya un límite a popa, la cubierta de madera se debe extender por lo menos hasta el extremo popel de la escotilla más a popa) y transversalmente a todo lo ancho de la manga del buque, con excepción de la anchura de un trancanil alomado que no exceda del 4 % de la manga y/o de la necesaria para colocar los pies derechos de soporte, y dado asimismo que la cubierta permanezca firmemente sujeta cuando el buque acuse grandes ángulos de escora, los criterios pueden ser:*

- *El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no será inferior a 0,08 metro-radián hasta un ángulo de escora = 40 o hasta el ángulo de inundación*
- *El valor máximo del brazo adrizante (brazo GZ) será como mínimo de 0,25 m.*
- *Durante todo el viaje, la altura metacéntrica GM0 no será inferior a 0,1 m, teniendo en cuenta la absorción de agua por la carga de cubierta y/o la acumulación de hielo en las superficies a la intemperie.*
- *Cuando se determine la aptitud de un buque para soportar los efectos combinados del viento de través y el balance con arreglo a 2.3, se respetará el límite de 16° del ángulo de escora provocado por un viento constante, pero se podrá dejar de lado el criterio adicional del 80 % del ángulo de inmersión de la línea de contorno de la cubierta.” [32]*

En la parte B del “Código de estabilidad sin avería, 2008”, tiene por finalidad recomendar criterios de estabilidad y otras medidas que garanticen la seguridad de determinados tipos de buques y ofrecer directrices con respecto a la información

Según este criterio, el máximo de la curva de brazos adrizantes debe estar situado en una escora comprendida entre los 30° y los 40° . Es decir, ha de cumplirse la condición:

$$30^\circ \leq \theta_m \leq 40^\circ$$

Finalmente, el criterio de Rahola establece una tercera condición que tiene que ver con la estabilidad dinámica. La condición es que el brazo GZ dinámico para una escora de 40° ha de ser, como mínimo, de 8 centímetros/radian. [34]

- Valores mínimos de GZ para los ángulos de escora:

Escora = 20°	$GZ = 0,14$ m
Escora = 30°	$GZ = 0,20$ m
Escora = 40°	$GZ = 0,20$ m

Tabla 1. Valores mínimos GZ para ángulos de escora [35]

- El máximo de la curva de brazos GZ deberá estar comprendido entre los ángulos 30° y 40°
- El brazo dinámico para 40° debe ser como mínimo 8 cm/radián. Si el ángulo de inundación es menor a 40°

En cuanto a su representación gráfica, la curva de estabilidad estática del buque, considerando sus peores condiciones de estabilidad en servicio, siempre tendrá en esas inclinaciones unos valores de GZ superiores a los de Rahola e igualmente en lo que respecta al valor de su estabilidad dinámica. [35]

5. Comparativa de estabilidad entre los buques Volcán de Timanfaya y Volcán del Teide

Después de haber hecho un resumen histórico de los accidentes que han ocurrido, la evolución de la estabilidad, su importancia y conceptos clave y la normativa relacionada con la estabilidad de los buques, en esta parte vamos a exponer algunos datos de estabilidad de dos buques del tipo Ro-Pax de la compañía Naviera Armas S.A. Se trata de los buques “Volcán de Timanfaya” y “Volcán del Teide”. Como la estabilidad del buque va ligada a la estiba de éste, comenzaremos explicando las características de uno y otro buque así como sus formas de estiba. Todo buque de ésta compañía debe realizar las cargas y descargas conforme las siguientes normas que aparecen en el Manual de Gestión de seguridad. [36]

“Recepción de carga a bordo

El objetivo de la Compañía es asegurar que la carga que transporta el buque está correctamente distribuida y estibada de acuerdo con las normas de seguridad y prevención de la contaminación, de forma que el buque mantenga en todo momento sus condiciones de navegabilidad.

Procedimiento

- El Capitán es el responsable de la correcta estiba de la carga.*
- Siempre habrá un Oficial responsable durante las operaciones de recepción y entrega de la carga, el cual mantendrá informado al Capitán del desarrollo de todas las operaciones.*

- La carga será estibada y trincada de acuerdo con el manual de estiba y sujeción de la carga, aprobado por la Administración, el cual debe de estar permanentemente a bordo.

- El Oficial de guardia prestará su máxima atención en que en ningún momento el barco quede en una condición de asiento o de escora que pueda afectar a la resistencia estructural o a la capacidad de maniobra para una salida del atraque súbita en caso de emergencia.

- Será obligación del Capitán vigilar que estas operaciones se hagan de acuerdo con los preceptos de la buena práctica marinera.

- El buen trincado de la carga es garantía de la seguridad del barco durante el viaje.

- Antes de comunicar el Primer Oficial de Cubierta al Capitán que el barco está listo para zarpar, habrá comprobado que las rampas están cerradas y trincadas y que los vehículos están estibados, teniendo en cuenta el pronóstico del tiempo.” [36]

Según el manual de la naviera, se proponen dos tipos de trincajes dependiendo de la ruta que vaya a efectuar el barco, que corresponden con las siguientes tablas.

La sujeción de la carga para la navegación entre las Islas Canarias sería la siguiente:

Tipo de vehículo		Trincas		Calzos	
		Buen tiempo	Mal tiempo	Buen tiempo	Mal tiempo
Automóvil		---	---	---	---
Autobús		---	1+1	1+1	2+2
Furgón – camión		1+1	Mínimo 2+2	---	Mínimo 1+1
Plataforma + tracción		1+1	Mínimo 3+3	---	Mínimo 1+1
Plataforma	Con carga	2+2	Mínimo 3+3	---	Mínimo 1+1
	Sin carga	2+2	Mínimo 2+2		

Tabla 2. Trincaje para navegación entre islas [36]

Para navegaciones internacionales y cabotaje a la península el trincaje sería el siguiente:

	TRINCAS		CALZOS	
Tipo de vehículos	BUEN TIEMPO	MAL TIEMPO	BUEN TIEMPO	MAL TIEMPO
Automóvil	---	---	---	---
Autobús	---	1+1	1+1	1+1
Furgón/Camión	1+1	Mínimo 2+2	1+1	Mínimo 1+1
Plataforma + tracción	2+2	Mínimo 3+3	1+1	Mínimo 1+1
Plataforma	2+2	Mínimo 3+3	1+1	Mínimo 1+1

Tabla 3. Trincaje para navegación internacional [36]

5.1 Características generales de las embarcaciones

5.1.1 Volcán de Timanfaya

A continuación se adjuntan las características generales del buque Volcán de Timanfaya:

Registro	Nombre Volcán de Timanfaya	Nº IMO 9281334	Distinto de llamada ECHT	Armador Naviera Armas S.A	Construido: HIJOS DE J. BARRERAS S.A.	Año 2005
General	Eslora 142,45 m	Manga 24,20 m	Puntal 13,55 m	Calado máximo 5,75 m	Arqueo bruto 17343	
Capacidad	Máximo pasaje 973	Tripulantes 27		Francobordo		2666 mm
Capacidad de carga	403 vehículos	69 trailers				

Propulsión	Nº MM.PP 2	Tipo 7L48/60CR	Marca MAN DIESEL SE	RPM 500	Potencia Total 2x8400 kW	
Hélices de maniobra	Nº 2	Marca ROLLS ROYCE	Tipo TT 2000 ICP			
Velocidad de servicio	23,5 kts	al 85%: 22 kts	Consumo:		al 85%: 3000 l/h	

Tabla 4. Características buque “Volcán de Timanfaya” [elaboración propia]



Imagen 9. Volcán de Timanfaya atracado en Morrojable [elaboración propia]

El buque “Volcán de Timanfaya” se trata de un buque Ro-Ro, o más concretamente un buque del tipo Ro-Pax, es decir, que transporta carga rodada y pasaje. La tripulación, bajo el mando del capitán, se compone de tres oficiales de cubierta para las guardias de navegación, el control de la carga y descarga de vehículos, un jefe de máquinas y tres oficiales de máquinas, junto con un caldereta, un engrasador y un electromecánico para el mantenimiento de la maquinaria del buque, cinco marineros y un contraamaestre para colaborar en los trabajos que les asignen sus respectivos

oficiales, así como el personal de fonda que, entre otras funciones, se encargan de atender al pasaje durante el trayecto.

5.1.1.1 Operatividad del buque

Las instalaciones de los equipos del buque se proyectan, fabrican y montan según las Reglas del Bureau Veritas donde sean de aplicación para la cota CLASS 1 + HULL + Mach Ro-ro passenger ship.

El equipo se proyecta para funcionar en las siguientes condiciones extremas durante la carga y estancia en puerto:

- Asiento: hasta un máximo de +/- 1,5 grados.
- Escora: hasta un máximo de 3 grados. [37]

5.1.1.2 Entrada de la carga al buque

Para el acceso a bordo se disponen a popa dos rampas embisagradas a la Cubierta nº 3 (Principal). Cada rampa consta de una sección principal, una segunda sección que pliega sobre la primera, y rampillas adicionales en sus dos extremos para realizar la transición con el muelle, y con la cubierta del buque. [37]

La rampa funciona con una inclinación máxima de +/- 7 grados y están diseñadas para los grados de asiento y escora según las Reglas del Bureau Veritas (2 grados/5 grados). El peso de las rampas, incluyendo accesorios y elementos de los circuitos es de unas 130 t aproximadamente. No obstante, para el tránsito de dos camiones cargados, se establece una limitación de escora de 3 grados. La sustentación de la rampa una vez extendida es sobre la superficie del muelle. [37]

Las dimensiones de los accesos de la carga son:

Altura máx. en cbta. 3	Altura máx. en cbta. 4	Altura máx. en cbta. 4 Con cardeck levantada	Altura máx. en cbta. 5
4,50 m	2,40 m	4,50 m	2,15 m

Tabla 5. Dimensiones de los accesos [37]

Ancho acceso a cubierta 3	4,20 m	Ancho acceso a cubierta 4	3,70 m
---------------------------	--------	---------------------------	--------

Tabla 6. Ancho de los accesos [37]

5.1.1.3 Tipos de cargas

Los equipos que hay abordo se diseñan para los siguientes tipos de cargas:

A. Cargas uniformes

Las cargas que entran a bordo deben ser siempre uniformes, es decir, si se quiere estibar carga a granel, esta debe ser estibada antes en un contenedor, cuba, etc, donde dicha carga en conjunto sea uniforme.

B. Cargas rodantes

Las cargas uniformes comentadas anteriormente para ser estibadas entran a bordo mediante un medio rodante, ya sea un camión, un vehículo, un remolque... Los tipos principales que entran a bordo son:

- Camión articulado de ruedas neumáticas (de carretera, tipo semi-remolque) de peso total 48 t, sobre 4 ejes (remolque con dos ejes), carga máxima sobre eje simple de 14 t.
- Camión articulado de ruedas neumáticas (de carretera, tipo semi-remolque) de peso total 54 t, sobre 5 ejes (remolque con tres ejes), carga máxima sobre eje simple de 11,5 t.
- Camión articulado de ruedas neumáticas (de carretera, tipo semi-remolque) de peso total 26 t, sobre 5 ejes (remolque con un eje), carga máxima sobre eje simple de 15 t.
- Furgones de 12 t.
- Automóviles normales, supuestos de un peso de 2 t.

Para el tránsito de dos camiones cargados, se establece una limitación de escora de 3 grados. [37]

C. Pasaje

En este buque como en otros ferries de pasaje, éste accede mediante unas escalas que se sitúan a los costados, en este caso a la altura de la popa. La puerta de costado está formada por una sola hoja que abre hacia el interior, hasta los noventa grados.

El peso total de la puerta, con marco, accesorios mecánicos e hidráulicos, y junta de estanqueidad es de 1,8 t. [37]

5.1.1.4 Espacios de carga

Las principales zonas de carga del buque son la cubierta 3 o cubierta principal, la cubierta 4 o shelter, y la cubierta 5, también llamado car-deck.

- Cubierta 3

La cubierta 3 suele estar destinada a lo que serían planchas y furgones, por la facilidad a la hora de su entrada, puesto que están al mismo nivel que el muelle y no hay problemas en la articulaciones de los camiones por tener que subir una rampa con mucha inclinación.

La cubierta se divide en siete calles, denominadas calle 4 o calle central a la calle que está en proa, e islas a los huecos que hay al medio de la cubierta formados por los dos troncos de escaleras del buque. Luego tenemos tres a cada banda, comenzando de los costados hacia la crujía del barco, denominándose esas seis calles como calle 1 Br, calle 2 Br y calle 3 Br, y viceversa, calle 1 Er, calle 2 Er y calle 3 Er. Por último, a las zonas que quedan debajo de las rampas de acceso a la cubierta 4, se le denomina cajones.

A la hora de cargarlas, se comienza siempre por la calle central, donde caben una plancha y un furgón, y a continuación se iría rellenando las calles 3, 2 y 1 de forma equilibrada, siempre analizando la estabilidad del buque.

Para la estiba de las planchas, las de mayor peso siempre irán a las calles más centrales, bien o la calle 4 o a las calles 3 de cada banda. Junto a esta puntualización hay que tener en cuenta la presencia o no de mercancías peligrosas según el Código IMDG, las cuales tendrían preferencia respecto a las pesadas a la hora de su estiba en

las calles más centrales. Además, este tipo de mercancías hay que tener en cuenta los tipos que se llevan a bordo y las posibles incompatibilidades y reacciones que se podrían producir en caso de accidente.

Por último, los denominados cajones, se usan para la estiba de maquinarias especiales como podrían ser tractores, palas, etc, o bien para vehículos averiados que precisan de la ayuda de una grúa para poder salir del barco una vez llegado al destino.

- Cubierta 4 o cubierta shelter

Ésta cubierta se suele destinar exclusivamente a la estiba de los vehículos de pasaje y de carga, aunque en determinadas ocasiones también se suelen estibar furgones en ella, ya que éstos no tienen el problema de las planchas para subir lo que sería la rampa.

- Cardeck o cubierta 5

El cardeck o cubierta 5 se sitúa entre la cubierta 4 y 6. Ésta es una cubierta móvil, es decir, se puede usar, o mantener estibada justo debajo de la cubierta 6, y está formada por 11 módulos izables, sobre los que se pueden estibar automóviles que acceden a ellos por:

- popa, por los módulos extremos, que pueden actuar como rampa en su totalidad
- proa, a través de dos rampas incorporadas a uno de los módulos.

Alternativamente, permanecen estibados en el techo del garaje, de forma que los camiones puedan ser cargados también en la cubierta 4.

La superficie del cardeck bajado en su totalidad da aproximadamente unos 2.290 metros cuadrados donde se pueden estibar únicamente vehículos de tamaño normal de 2t de peso. La suma de los módulos del cardeck, incluyendo accesorios y elementos de los circuitos, da un peso de alrededor de unas 230 t aproximadamente. Los módulos-rampa (proa y popa), pueden izarse cargados con automóviles. [37]

5.1.2 Volcán del Teide

A continuación se adjuntan las características generales del buque Volcán del Teide:

Registro	Nombre VOLCÁN DEL TEIDE	Número IMO 9506289	Indicativo EAIE	Armador NAVIERA ARMAS	Construido por: HIJOS DE J. BARRERAS S.A.	Año: 2010
Capacidad	Máximo pasaje 1457 pers.	Total tripulantes 43				
General	Eslora 175,70 m	Manga 24,40 m	Puntal 14,94 m	Calado máximo 6,5 m	Francobordo 2010 mm	Arqueo bruto 29514
Capacidad de carga	Metros lineales carga 2010 m	Cubierta 1 196 m	Cubierta 3 (Principal) 849 m	Cubierta 5 965 m	Cubierta 6 (Cardeck) 517 m	
Propulsión	Nº de MM PP 4	Tipo 7L48/60CR	Marca MAN DIESEL SE	Modelo 7L48/60CR	RPM 500	Poten. 4x8400 Kw
Auxiliares	Nº de MM.AA 3	Tipo 6M20C	Marca MAK	Modelo M20C	Potencia 1140 Kw	RPM 1000
Hélice de proa	Nº 2	Marca ROLLS ROYCE	Tipo TT 2000 ICP	Velocidad 25 nudos	Consumo MM.PP(Fuel) 6000 l/h	

Tabla 7. Características buque “Volcán del Teide” [elaboración propia]



Imagen 10. Volcán del Teide [38]

El Volcán del Teide cuenta con 175,70 metros de eslora con capacidad para 1457 pasajeros y 2010 metros lineales de espacio para vehículos particulares y transporte de mercancías rodada. Posee cuatro plantas motrices de 8400 Kw de potencia cada una, dos hélices transversales a proa, sistema de estabilizadores dinámicos y sistema propulsor Kamewa de hélices de paso variable. La tripulación, bajo el mando del capitán, se compone de tres oficiales de cubierta para las guardias de navegación, el control de la carga y descarga de vehículos, cuatro oficiales de máquinas, un electromecánico, un caldereta y un engrasador para el mantenimiento mecánico del buque, ocho marineros para colaborar en los trabajos que les asignen sus respectivos oficiales, así como el personal de fonda que se encargan de todo lo relacionado con atender al pasaje durante el trayecto.

5.1.2.1 Entrada de la carga al buque

Para el acceso a bordo se disponen a popa dos rampas embisagradas a la Cubierta nº 3 (Principal). Cada rampa consta de una sección principal, una segunda sección que pliega sobre la primera, y rampillas adicionales en sus dos extremos para realizar la transición con el muelle, y con la cubierta del buque.

La rampa funciona con una inclinación máxima de +/- 7 grados y están diseñadas para los grados de asiento. No obstante, para el tránsito de dos camiones cargados, se

establece una limitación de escora de 3 grados. La sustentación de la rampa una vez extendida es sobre la superficie del muelle. [39]

5.1.2.2 Tipos de cargas

Al igual que el buque “Volcán de Timanfaya”, por ser del mismo tipo, los equipos que hay abordo se diseñan para los siguientes tipos de cargas:

A. Cargas uniformes

Las cargas que entran a bordo deben ser siempre uniformes, es decir, si se quiere estibar carga a granel, esta debe ser estibada antes en un contenedor, cuba, etc, donde dicha carga en conjunto sea uniforme.

B. Cargas rodantes

Las cargas uniformes comentadas anteriormente para ser estibadas entran a bordo mediante un medio rodante, ya sea un camión, un vehículo, un remolque... Los tipos principales que entran a bordo son:

- Camión articulado de ruedas neumáticas (de carretera, tipo semi-remolque) de peso total 48 t, sobre 4 ejes (remolque con dos ejes), carga máxima sobre eje simple de 14 t.
- Camión articulado de ruedas neumáticas (de carretera, tipo semi-remolque) de peso total 54 t, sobre 5 ejes (remolque con tres ejes), carga máxima sobre eje simple de 11,5 t.
- Camión articulado de ruedas neumáticas (de carretera, tipo semi-remolque) de peso total 26 t, sobre 5 ejes (remolque con un eje), carga máxima sobre eje simple de 15 t.
- Furgones de 12 t.
- Automóviles normales, supuestos de un peso de 2 t.

Para el tránsito de dos camiones cargados, se establece una limitación de escora de 3 grados.

C. Pasaje

Al igual que el anterior buque explicado y otros ferries de pasaje, éste accede mediante unas escalas que se sitúan a los costados, en este caso a la altura de la popa. La puerta de costado está formada por una sola hoja que abre hacia el interior, hasta los noventa grados. [37]

5.1.2.3 Espacios de carga

El buque dispone de 3 espacios de carga para camiones y vehículos en general y uno específico para automóviles, el llamado (cardeck).

- **Cubierta de carga nº1 (Doble fondo o bodeguín):** Dispone de 196 metros de carreteras de 3,00 metros de ancho, con capacidad máxima para 10 trailers de 16,5 metros. Está cubierta está preparada para estibar mercancías peligrosas (normalmente de la clase 2.2 y 9). [39]
- **Cubierta de carga nº3 (Cubierta principal):** Dispone de 849 metros de carreteras de 3,00 metros de ancho, con capacidad máxima para 45 trailers de 16,5 metros. [39]
- **Cubierta de carga nº5 (Cubierta superior):** Dispone de 955 metros de carreteras de 3,00 metros de ancho, con capacidad máxima para 52 trailers de 16,5 metros. [39]
- **Cubierta de carga nº6 (Cardeck):** Destinada al transporte de turismos y furgonetas ligeras. Dispone de 517 metros de carreteras de 2,20 metros de ancho, con capacidad máxima para 96 turismos de 4,5 metros. [39]

La capacidad máxima de pasajeros a bordo es de 1450 pasajeros.

Capacidad máxima de transporte de trailers y turismos (no simultáneamente)		
CUBIERTAS	TRAILERS DE LONGUITUD 16,5 m EN CARRETERAS DE 2,90m DE ANCHO CASSETES DE 16,5x2,9m	TURISMOS DE LONGUITUD 4,5m EN CARRETERAS DE 2,2m DE ANCHO CASSETES DE 4,65x2,2m
Cubierta nº1	10	-
Cubierta nº3	45	-
Cubierta nº5	52	259
Cubierta nº6	-	96
Total	107	355

Tabla 8. Capacidad máxima de carga del Volcán del Teide [39]

5.2 Análisis de la estabilidad

Para llevar a cabo el análisis de la estabilidad de los buques se ha utilizado las hojas de cálculo de estabilidad de ambos. En este caso se trata de una hoja previamente desarrollada de Excel, donde en ella se incluyen en su base datos todos lo referido para hacer dichos cálculos. La hoja de cálculo presenta varias páginas que comienzan por los datos y características del buque, una hoja con un plano del buque para situar la carga en su posición correcta, otra hoja para introducir los datos de la carga, las sondas de todos los tanques del buque, tanto de lastres como de fuel hasta los tanques de reboses y sentinas, y además muestra los calados con sus correcciones de las marcas, los datos de estabilidad y sus gráficas, con todos los datos e interpolaciones utilizados debajo. A continuación hay una hoja con las curvas hidrostáticas, y a continuación otras hojas con las curvas hidrostáticas para el trimado, las curvas KN y tablas de KG máximo y GM mínimo, y una última hoja donde se puede ver la curva de par de estabilidad estática transversal ampliada. Como criterio escogido para el estudio de la estabilidad estática transversal se ha utilizado el criterio de Rahola o regla de los mínimos.

5.2.1 Comparación en un viaje habitual

Primero comenzaremos analizando la estabilidad de los buques “Volcán de Timanfaya” y “Volcán del Teide” con carga habitual en sus trayectos. El buque “Volcán de Timanfaya” lleva una carga supuesta de 159 pasajeros, 23 planchas y 10 furgones en la cubierta 3, y 18 furgones y 39 coches en la cubierta 4. El “Volcán del

Teide” por su parte lleva 405 pasajeros y una carga supuesta de 14 planchas y 6 vehículos en la cubierta 1, 51 planchas, 4 furgones y 8 coches en la cubierta 3, 200 coches, 16 planchas y 3 furgones en la cubierta 5 y 38 coches en el cardeck. Para estas condiciones de carga los buques presentan estos datos:

Volcán de Timanfaya		Volcán del Teide
2297,10 t	Peso muerto	3766,41 t
7262,36 t	Peso en rosca	11980,41 t
9559,46 t	Desplazamiento	15746,82 t
3,23 m	GM_c	3,295 m
0,32 m	Asiento	0,10 m
5,29 m	C_m	6,154 m
5,13 m	C_{pr}	6,11 m
5,45 m	C_{pp}	6,21 m
5,29 m	C_{nm}	6,16 m

Tabla 9. Comparativa en viaje habitual [elaboración propia]

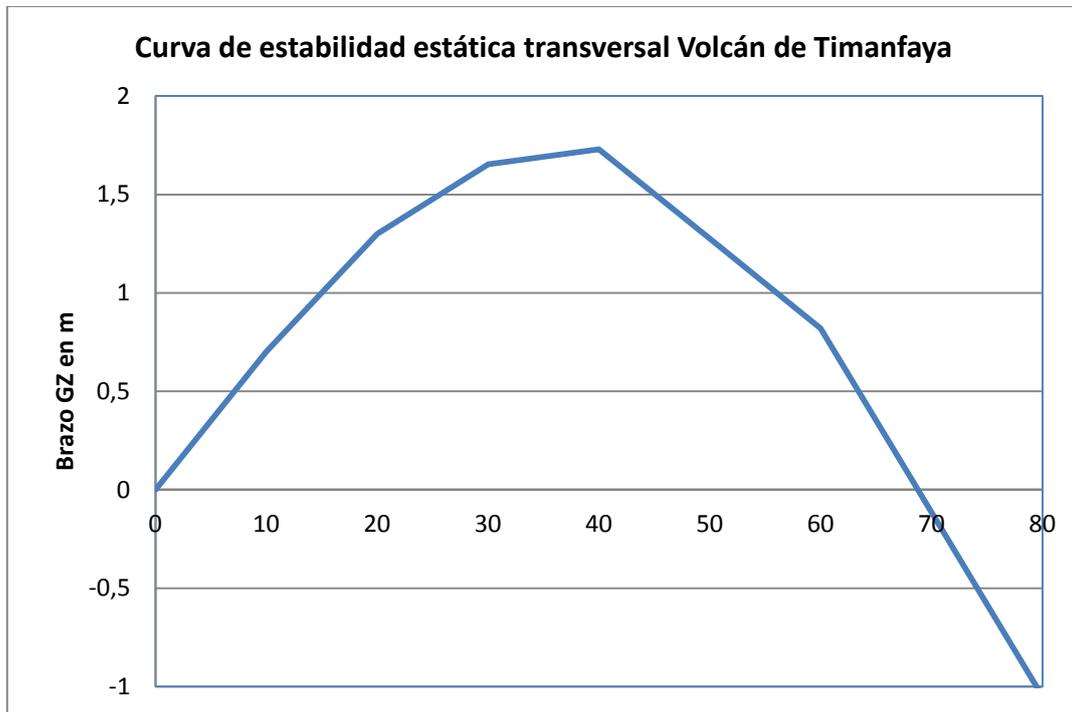


Gráfico 1. Curva de estabilidad [elaboración propia]

Escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Brazo GZ	0	0,702	1,299	1,654	1,730	1,275	0,820	-0,115	-1,05
Rahola			0,140	0,200	0,200				

Tabla 10. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola [elaboración propia]

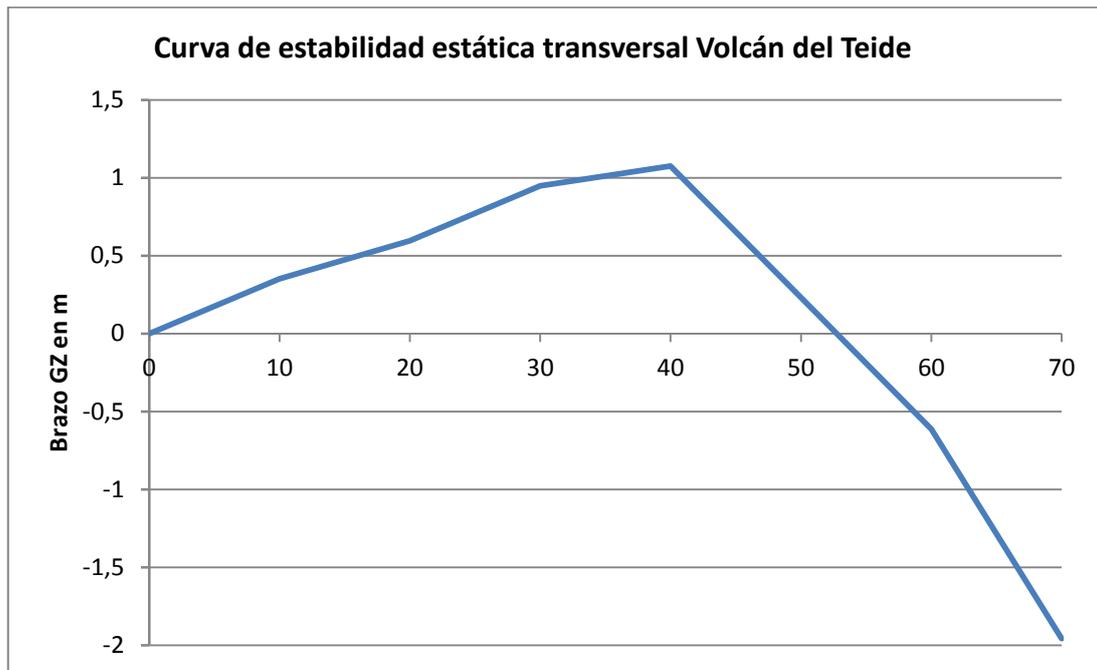


Gráfico 2. Curva de estabilidad [elaboración propia]

Escora	0	10	20	30	40	50	60	70
Brazo GZ	0	0,353	0,595	0,948	1,075	0,232	-0,612	-1,956
Rahola			0,140	0,200	0,200			

Tabla 11. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola [elaboración propia]

5.2.2 Comparativa a máxima carga

Para esta condición de carga los dos buques se han supuesto en sus condiciones de máxima carga. El “Volcán de Timanfaya” se le ha supuesto una carga de 23 planchas y 10 furgones en la cubierta 3, 18 furgones y 160 coches en la cubierta 4, y 110 coches en la cubierta 5 o cardeck, con un total de 973 pasajeros. Para el “Volcán del Teide” se le ha supuesto una carga de 10 planchas en la cubierta 1, 45 planchas en la

cubierta 3, 52 planchas en la cubierta 5 y 96 vehículos en el cardeck, con una cantidad de pasaje de 1457 personas.

Volcán de Timanfaya		Volcán del Teide
3500,41 t	Peso muerto	6075,76 t
7262,36 t	Peso en rosca	11980,41 t
10762,77 t	Desplazamiento	18056,17 t
3,66 m	GM_c	3,881 m
0,13 m	Asiento	-1,27 m
5,75 m	C_m	6,763 m
5,70 m	C_{pr}	7,53 m
5,82 m	C_{pp}	6,26 m
5,76 m	C_{nm}	6,89 m

Tabla 12. Comparativa en máxima carga [elaboración propia]

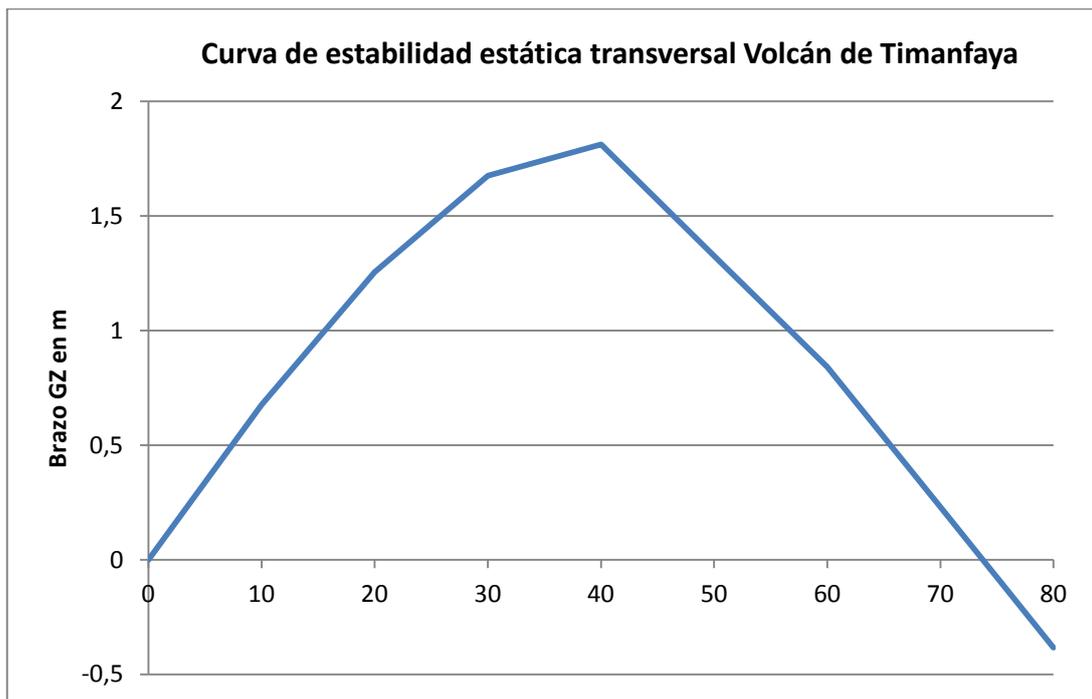


Gráfico 3. Curva de estabilidad [elaboración propia]

Escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Brazo GZ	0	0,676	1,255	1,675	1,812	1,326	0,841	0,229	-0,383
Rahola			0,140	0,200	0,200				

Tabla 13. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola [elaboración propia]

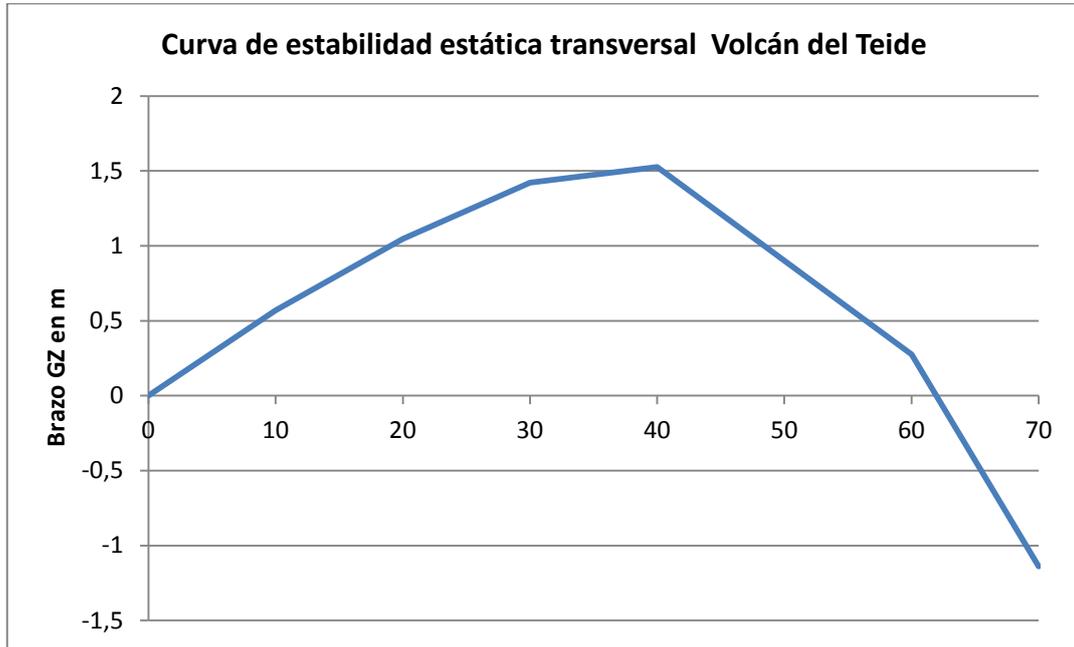


Gráfico 4. Curva de estabilidad [elaboración propia]

Escora	0	10	20	30	40	50	60	70
Brazo GZ	0	0,569	1,046	1,421	1,526	0,901	0,276	-1,14
Rahola			0,140	0,200	0,200			

Tabla 14. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola [elaboración propia]

5.2.3 Comparativa en lastre

Para esta condición, ambos buques se han supuesto sin carga abordo, solo con los tanques de lastre llenos.

Volcán de Timanfaya		Volcán del Teide
2111,51 t	Peso muerto	3409,53 t
7262,36 t	Peso en rosca	11980,41 t
9373,87 t	Desplazamiento	15389,94 t
3,98 m	GM _c	4,183 m
0,59 m	Asiento	1,15 m
5,22 m	C _m	6,053 m
4,91 m	C _{pr}	5,44 m
5,50 m	C _{pp}	6,59 m
5,21 m	C _{nm}	6,01 m

Tabla 15. Comparativa en lastre [elaboración propia]

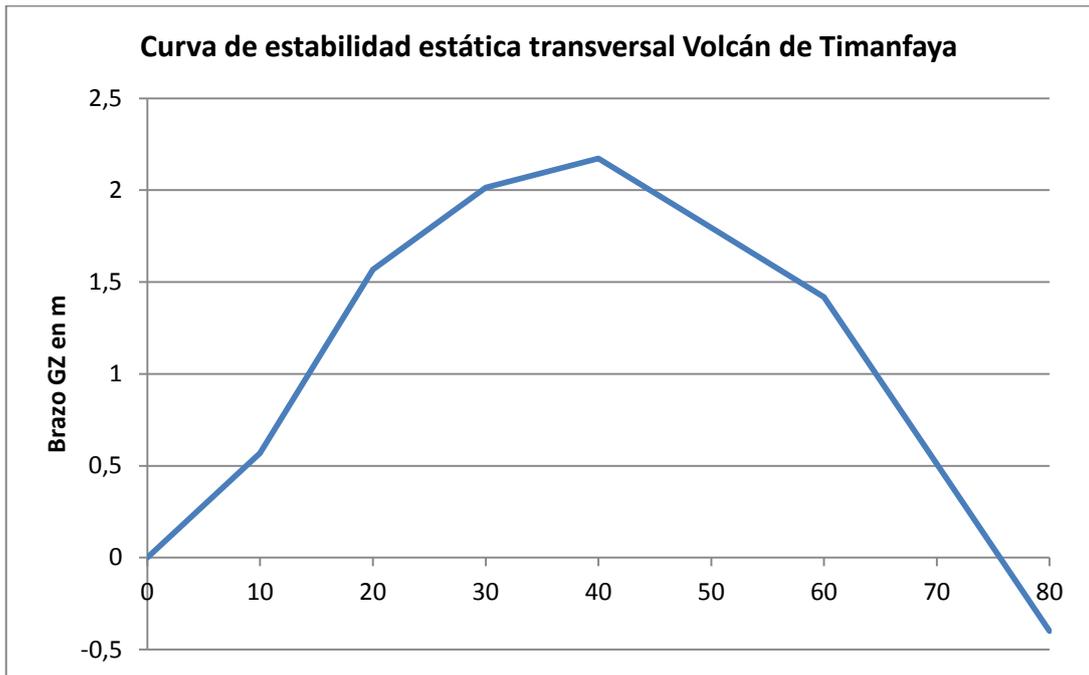


Gráfico 5. Curva de estabilidad [elaboración propia]

Escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Brazo GZ	0	0,569	1,568	2,015	2,172	1,795	1,418	0,51	-0,398
Rahola			0,140	0,200	0,200				

Tabla 16. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola [elaboración propia]

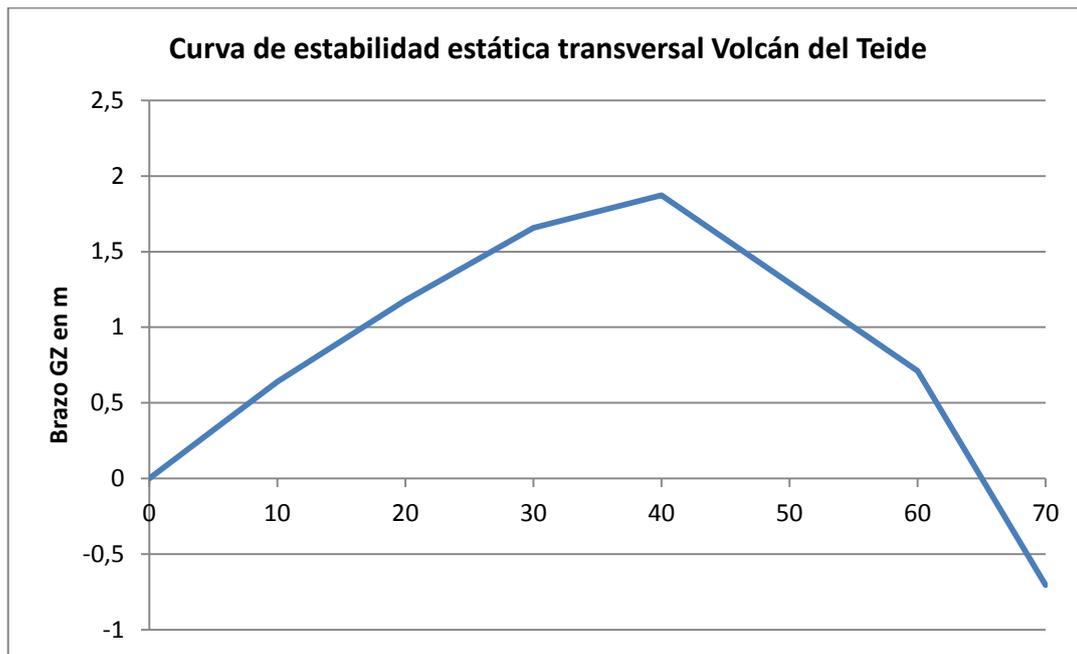


Gráfico 6. Curva de estabilidad [elaboración propia]

Escora	0	10	20	30	40	50	60	70
Brazo GZ	0	0,640	1,178	1,658	1,872	1,292	0,711	-0,703
Rahola			0,140	0,200	0,200			

Tabla 17. Datos tabulados del gráfico con Criterio de Rahola [elaboración propia]

6. Conclusión de la comparativa de estabilidad

Como se puede ver en las tablas anteriores, la diferencia de tamaño entre uno y otro barco queda plasmada directamente con observar los desplazamientos de uno y otro buque. En los calados se puede observar también la diferencia, aunque ambos buques tienen un asiento similar en el primer caso estando ligeramente apopados. Sin embargo en los otros dos casos el Volcán del Teide si presenta una notable diferencia en el asiento, siendo en el segundo caso aproante y en el último apopante. Según aconsejan los astilleros de construcción, para conseguir una mejor eficiencia en la navegación de este tipo de buque es que deben salir en aguas iguales, ya que por sus diseños de cascos ellos ya tienden a ir apoados, con lo que logran mejores registros de velocidad, dato importante en este tipo de buque de pasaje donde se busca la rapidez del transporte. Dentro de la diferencia que se observa en los calados medios, la diferencia se mantiene entre ambos buques en las distintas situaciones de carga. Analizando la altura metacéntrica en todos los casos se puede ver que son muy similares entre ambos buques, siendo ésta una característica más bien del tipo del buque que de la diferencia entre buques. Como estos tipos de barcos tienen exceso de estabilidad, a la hora de cargarlos son más flexibles que otros tipos de buques.

A continuación, pasando a analizar las gráficas con sus tablas de datos tabulados, se puede observar como claramente se cumple la condición de que el máximo par adrizante se encuentra entre los 30 y 40 grados de escora. En este caso coincide que se encuentra sobre los 40 grados de escora. Sin embargo se encuentra una diferencia notable, y es que el Volcán de Timanfaya tiene un par adrizante mayor en todas las situaciones, y es que en este caso la diferencia de eslora entre los buques no afecta, ya que hablamos de la estabilidad estática transversal, y la manga es la misma, por lo que la diferencia se produce por el mayor francobordo que posee el Volcán de Timanfaya frente al Volcán del Teide, lo que provoca que el agua llegue a la borda a una mayor inclinación, cosa que se puede observar también en la gráfica, donde el ángulo límite en el Volcán de Timanfaya es siempre mayor que el del Volcán del

Teide. Entre las tres situaciones de carga, observamos cerca de una media de 10 grados de diferencia en el ángulo límite donde la estabilidad se vuelve indiferente y pasar a luego a equilibrio inestable.

Por último, analizando esos datos con un criterio sencillo y muy comúnmente usado abordo por los oficiales, el criterio de Rahola, vemos como superan con creces los mínimos estipulados en este criterio.

Bibliografía

- [1] PLADESEMAPESGA, *Naufragios, un episodio increíble: el Deneb*, [en línea], 2011, URL:
<http://pladesemapesga.com/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=31950>
- [2] NUESTRO MAR, *Muere un integrante del equipo de salvamento del carguero "Cougar Ace" accidentado en Alaska*, [en línea], 2006, URL:
http://www.nuestromar.org/noticias/transporte_maritimo_y_fluvial082006_muere_un_integrante_del_equipo_de_salvamento_del_carguero_cougar
- [3] WEBMAR, *Accidentes: Cougar Ace – Mando unificado*, [en línea], 2006, URL:
<http://www.webmar.com/archives/tag/accidentes/page/40>
- [4] MV ESTONIA, *Investigation report on video footage and other matters*, [en línea], 2001, URL: <http://www.estoniaferrydisaster.net/pdf/Enclosure10.pdf>
- [5] MIKAEL, L., *Titanicnorden*, [en línea], 2002, URL:
<http://www.titanicnorden.com/skepp/estonia.html>
- [6] Jar Torre, L., *Historia y arqueología marina: naufragios y accidentes marítimos*, [en línea], 2003, URL: <http://www.histarmar.com.ar/InfGral/PuertasAlMar-Herald.htm>
- [7] Mey, C., *Historia y arqueología marina: naufragios y accidentes marítimos*, [en línea], 2003, URL: <http://www.histarmar.com.ar/AccidentesMaritimos/P-StellaMare.htm>
- [8] UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, “ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE PESQUEROS EN OLAS REGULARES DE PROA” TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE: INGENIERO NAVAL CLAUDIO ALEXIS RODRÍGUEZ CASTILLO PROMOCIÓN 1999-II LIMA-PERÚ 2008

- [9] BIOGRAFÍAS Y VIDAS, *Arquímedes*, [en línea], 2004-14 URL: <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/a/arquimedes.htm>
- [10] 100CIA QUÍMICA, *Biografía Simon Stevin*, [en línea], 2014 URL: <http://www.100ciaquimica.net/biograf/cientif/S/stevin.htm>
- [11] ALMEIDA SANTOS NEVES, M.; L. BELENKI, V.; OTTO DE KAT, J.; SPYROU, K.; UMEDA, N. *Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves*, ed. 2010, London: Springer, 2010, ISBN 978-94-007-1482-3
- [12] SCHOOL OF MATHEMATICS AND STATISTICS UNIVERSITY OF ST ANDREWS, *Pierre Bouguer*, [en línea], 2000 URL: <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Bouguer.html>
- [13] ENRIQUE R. AZNAR, *Departamento de álgebra, Biografías: Leonhard Euler*, [en línea], 2007 URL: <http://www.ugr.es/~eaznar/euler.htm>
- [14] MARTÍNEZ GUANTER, A., “Biografía de don Jorge Juan y Santacilia”, *Todo a babor*, [en línea], URL: http://www.todoababor.es/articulos/bio_jorgejuan.htm
- [15] ENCYCLOPEDIA.COM, *Atwood, George*, [en línea], URL: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830900185.html>
- [16] UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK GENT, *Boeker&meer, mercat: architect**, URL: http://search.ugent.be/meercat/x/all-view?q=architect*&start=12539&filter=&sort=&rec=hth01:008600439
- [17] FAMOUS SCIENTISTS, *Daniel Bernoulli*, [en línea], URL: <http://www.famousscintists.org/daniel-bernoulli/>
- [18] WIKIPEDIA, *Jaakko Rahola*, [en línea], 2014, URL: http://fi.wikipedia.org/wiki/Jaakko_Rahola
- [19] ECURED, *William Froude*, [en línea], URL: http://www.ecured.cu/index.php/William_Froude
- [20] STRUCTURAE, *Persons: Aleksey krylov*, [en línea], 2014, URL: <http://structurae.net/persons/aleksey-krylov>

- [21] SHIPSTAB, *Proceedings of STAB & ISSW*, [en línea], 2014, URL: <http://www.shipstab.org/index.php/conference-workshop-proceedings>
- [22] Arriola E., *Apuntes de clase*, 2014
- [23] BONILLA DE LA CORTE, A., *Teoría del buque*, 3ª ed. Cadiz: Librería San José, 1979. ISBN: 84-85645-02-2
- [24] Van Dokkum, K.; ten Katen H.; Koomen K.; Pinkster J., *Ship stability*, 4ª ed. Enkhuizen: Dokmar, 2010, ISBN 978-90-71500-15-2.
- [25] MARINE ALIGNMENTS, *Easeacon* [en línea], 2014 URL: <http://www.marinealignment.com/products/easeacon/>
- [26] KOCKUM SONICS, *Loadmaster* [en línea], 2014 URL: <http://www.kockumsonics.com/products/marine/loadmaster.htm>
- [27] HYDROGRAPHIC AND MARINE CONSULTANTS B.V., *Profile* [en línea], 2014 URL: <http://www.hmc.nl/company/profile/>
- [28] HYDROGRAPHIC AND MARINE CONSULTANTS B.V., *CPC*, [en línea], 2014 URL: <http://www.hmc.nl/mba/cpc/>
- [29] PARDO JARIOD, A., “EDI en Comercio Exterior: BAPLIE”. *Innovando para un futuro mejor*, [en línea], 2011 URL: <https://anapardojariod.wordpress.com/2011/09/18/edi-en-comercio-exterior-baplie/>
- [30] HYDROGRAPHIC AND MARINE CONSULTANTS B.V., *CPC screen uploads*, [en línea], 2012 <http://www.hmc.nl/AAAhmcWP2012/wp-content/uploads/2012/05/cpc.png>
- [31] FRANCESCUTTO, A., “El desarrollo de los criterios de estabilidad del buque a la luz de los progresos de la arquitectura naval”, [en línea], URL: <http://intranet.usat.edu.pe/usat/files/2011/10/Lecci%C3%B3n-magistral-del-Doctor-Alberto-Francescutto.pdf>

- [32] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, *Ministerio de asuntos exteriores y de cooperación: Disposiciones generales: 5295 Código Internacional de Estabilidad sin avería, 2008 (Código IS 2008), adoptado el 4 de diciembre de 2008 mediante Resolución MSC 267(85), nº70, sec. I, pág. 30864, Miércoles 23 de marzo de 2011*
- [33] ESTABILIDAD DEL BUQUE I, *Criterios generales de estabilidad de la OMI*, [en línea], 2011, URL: <http://estabilidadbuque.blogspot.com.es/2012/04/criterios-generales-de-estabilidad-omi.html>
- [34] ESTABILIDAD DEL BUQUE I, *Características, cálculo y trazado de la curva de estabilidad. Pantocarenas*, [en línea], 2011, URL: <http://estabilidadbuque.blogspot.com.es/2011/08/caracteristicas-calculo-y-trazado-de-la.html>
- [35] BONILLA DE LA CORTE, A., *Teoría del buque*, 3ª ed. Cadiz: Librería San José, 1979. ISBN: 84-85645-02-2
- [36] NAVIERA ARMAS, *Manual de gestión y seguridad*, 2011
- [37] SP CONSULTORES Y SERVICIOS, *Manual de instrucciones de uso y mantenimiento*, Vigo, 2005
- [38] WORLD WIDE FERRIES, *Intensa lucha en las encuestas del Ferry del Año*, [en línea], 2013, URL: <http://wwferry.blogspot.com.es/2013/02/intensa-lucha-en-las-encuestas-del.html>
- [39] NAVIERA ARMAS, *Manual de carga y estiba Volcán del Teide*, Vigo: 2010

