LA ALTURA METACENTRICA DE LAS OLAS. SU INFLUENCIA EN LA DESESTABILIZACION DE ROLL CAUSADA POR RESONANCIA PARAMETRICA*

Nelson Pérez M., M. Sc.** Carlos Sanquinetti V., M. Sc.**

Introducción

a frecuencia de siniestros y accidentes en embarcaciones menores por problemas de estabilidad transversal en el mar (aquellas de eslora de hasta unos 26 a 28 metros) sigue siendo alta, a pesar de la preocupación de los ingenieros y de los resguardos y aplicación de normas, criterios e inspecciones que aplica la autoridad marítima para la estabilidad transversal.

Es que, en definitiva, este tipo de problemas escapan al análisis de estabilidad estática transversal tradicional y de sus criterios o recomendaciones y se adentran en lo que se refiere al comportamiento del buque en el mar, lo que podría ser denominado: "Estabilidad del movimiento de balance". Por tanto, resulta relevante conocer e investigar más, desde puntos de vista científicos, el comportamiento de estas naves en olas y difundir los resultados a tripulaciones y profesionales del área.

Uno de los tantos fenómenos presentes en el balance transversal del buque es el denominado "resonancia paramétrica de la oscilación de balance", que ocurre con olas longitudinales a su avance (o sea, incidiendo por proa o por popa). Este consiste en un movimiento oscilatorio del balance transversal, que aumenta rápidamente de amplitud y que se produce al navegar el bu-

que en olas longitudinales de aspecto regular, es decir, que "cortan" al buque con un período o frecuencia relativamente similar durante un lapso y que por la dirección de incidencia no se espera que se pudiera desencadenar algún importante efecto escorante de grandes ángulos de roll ni menos que ocurra muy rápidamente.

Una descripción científica del fenómeno puede encontrarse en las referencias 1, 9, 13, etc., en donde el lector interesado puede revisar los aspectos analítico-matemáticos que explican el fenómeno, mediante el correspondiente ecuacionamiento diferencial de los movimientos del buque en las olas, en un sistema inercial como el mostrado en la figura 1.

El problema es causado básicamente por las fluctuaciones de altura metacéntrica que provocan las olas al pasar longitudinalmente por la carena, ocupando sucesivas posiciones de arrufo y quebranto. El fenómeno se produce con la presencia de ciertas formas de sintonía entre frecuencia natural de balance del buque y frecuencia de encuentro de las olas longitudinales.

Se puede constatar que los buques menores, como pesqueros, naves oceanográficas, de patrullaje, misileras, de prácticos, etc., son mucho más afectados por este fenómeno que buques mercantes de mayor tamaño. Se piensa que esto sería principalmente debido a que en los primeros las variaciones de las formas del plano de

** Académicos del Instituto de Ciencias Navales y Marítimas, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, de la Universidad Austral de Chile.

Cille

^{*} Trabajo titulado originalmente "Influencia de la Altura Metacéntrica" y de la Altura de las Olas en la Desestabilización de Roll causada por Resonancia Paramétrica" y realizado con el apoyo económico del Fondo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile.

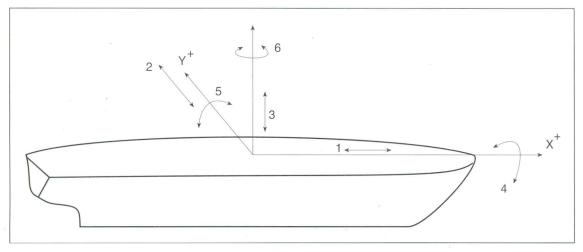


Figura 1

flotación con cresta de ola a media nave son bastante mayores que en cargueros de línea en olas de bajas alturas, la cual genera en buques pequeños fuertes efectos no lineales en las ecuaciones de movimientos, particularmente en los momentos de restauración del balance transversal.

Debe aclararse que este fenómeno no debe ser confundido con el problema de oscilación resonante simple del movimiento de balance.

Las ecuaciones no lineales del movimiento general acoplado total del buque, expresadas en forma matricial, estarían dadas por:

por: $\widetilde{\mathbb{Q}} = \widetilde{\mathbb{Q}} = \mathbb{Q}$

M= Matriz de masa del sistema

A = Matriz de inercia y masa adicional

B = Matriz de amortiguación

C = Matriz de restauración

q = Vector de aceleraciones

q = Vector de velocidades

q = Vector de desplazamiento del sistema

Q_(t) = Vector de excitación por olas

Desacoplando de (1) la ecuación diferencial lineal para movimiento de balance, pero incluyendo el efecto no lineal de las fluctuaciones de altura metacéntrica causadas por la sucesiva pasada longitudinal de crestas y senos de las olas a media nave, se obtiene:

$$(I_X + A_{44}) \ddot{O} + B_{44} O + [C_{44} + \partial C_{44} (t)] O = O_{(t)}$$
 (2)
En que:

- I_X representa el momento de inercia transversal del buque

— A₄₄, B₄₄, C₄₄ son coeficientes lineales de inercia adicional, de amortiguación y de restauración, respectivamente, en el movimiento de balance transversal desacoplado.

— $\partial C_{44}(t)$ representa las fluctuaciones que experimenta el coeficiente de restauración a causa de la sucesiva pasada de olas longitudinalmente, y su consiguiente efecto de modificación de altura metacéntrica transversal GM_T y del desplazamiento Δ del buque. Además, \ddot{O} , O y O representan la aceleración, velocidad y ángulo del movimiento de balance, respectivamente; por último, $O_{\{t\}}$ representa el momento de excitación de movimientos de roll que causan las olas.

Mayores antecedentes pueden verse en referencias 1, 9, 11, 12, 13 y 15.

Entonces, se puede demostrar matemáticamente que existen zonas de movimientos estables e inestables, tal como se puede ver en la figura 2, en que:

$$\begin{array}{c} 2\\ \partial o \approx \left[\frac{w_{4}}{w_{2}}\right]\\ \\ \underline{\Sigma}o \quad \underbrace{(\underline{\Delta}\cdot\overline{GM}_{T})o}_{\Delta \quad \overline{GM}_{T}} \quad \text{donde:} \end{array}$$

w₄ = Frecuencia natural de oscilación de roll

w_e = Frecuencia de encuentro entre buque y olas

Δ = Desplazamiento del buque

GM_T = Altura metacéntrica transversal (Δ GMT) = Variación máxima que experimenta el productó (Δ • GMT), entre posición quebranto y arrufo en olas

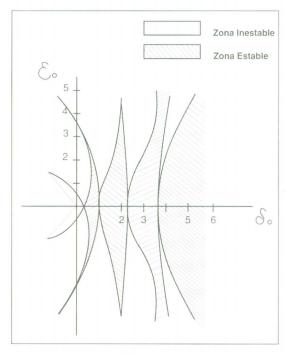


Figura 2

(en que la principal variación es probablemente al GMT).

Observando la figura 2 se puede verificar que en los valores:

 $\partial o = 1/4$ o sea, que en combinaciones we = 2w4

así como en valores próximos a ésta, se encuentra la zona inestable más peligrosa, teniendo en cuenta que con valores muy pequeños Σ o se cae en una amplia zona inestable; es decir, pequeñas fluctuaciones de altura metacéntrica GM_T y de desplazamiento Δ causados por la pasada sucesiva de las olas, pueden desencadenar desestabilización del movimiento de balance con características resonantes.

Análisis experimental

A raíz de lo anterior resulta importante investigar más si en este tipo de embarcaciones la resonancia paramétrica puede realmente llevar al buque a ángulos de escora grandes, o bien, desarrollarse estas oscilaciones en tan corto tiempo que pueda ser considerada una potencial causa directa o indirecta de accidentes (volcamientos, corrimientos de carga, embarques de agua por cubierta, etc., a raíz de oscilaciones muy amplias).

Con este propósito, en el tanque de pruebas de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, de la Universidad Austral de Chile, fue desarrollado un programa de pruebas a escala de este fenómeno. Para este efecto fueron utilizados dos modelos a escala correspondientes a buques de

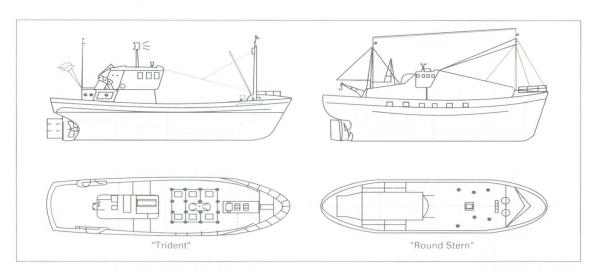


Figura 3

TABLA 1
Caracteristicas principales de los prototipos de pruebas

	27	"Trident"	"Round Stern"
LOA	(m) eslora total	25,91	24,36
Lpp	(m)	22,09	21,44
В	(m) manga	6,86	6,71
D	(m) puntal	3,35	3,35
Т	(m) calado	2,48	2,49
Δ	(t) desplazamiento	170,30	162,6
LCF	(m)	- 0,84	-0,69
r _T	(m) radio de giro transversal	2,68	2,62
rL	(m) radio de giro longitudinal	5,52	5,36
Tipo de popa		espejo	redonda
Pantoque en cuerpo de proa		redondo	redondo
Pantoque en cuerpo de popa		quebrado	redondo

pesca del orden de 24 metros de eslora total, cuyas características principales se dan en la tabla 1, y que denominaremos "Trident" y "Round Stern" (figura 3).

Los modelos fueron construidos en fibra de vidrio, FGRP, con el fin de facilitar la reproducción a escala de los radios de giro con la distribución de masa a bordo. Su escala 30 fue seleccionada a fin de compatibilizar la frecuencia natural de roll de los modelos con las frecuencias del generador de olas regulares en este tanque (generador que es de tipo flap).

Ambos modelos con número de Froude, FN = O, fueron expuestos en el tanque de pruebas a olas incidiendo por proa, con frecuencias de encuentro entre el modelo y las olas

$$W_{e} = 2 W_{4}$$

correspondientes aproximadamente a la zona inestable $\partial o = 1/4$ de Mathieu.

Los modelos fueron preparados y ensayados similarmente como se describe en la referencia 1.

El programa de pruebas a escala incluyó pruebas para cinco diferentes alturas metacéntricas en cada modelo, cada una de ellas ensayadas a su vez para cinco alturas de olas, respectivamente.

El desarrollo del fenómeno fue monitoreado mediante registro continuo de Video-TV en el dominio del tiempo y los resultados posteriormente extrapolados para tamaño real. Las figuras

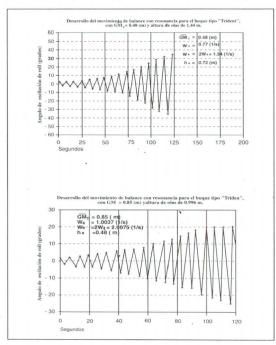


Figura 4

4 y 5 son algunos de los resultados registrados, en los más de cincuenta ensayos efectuados.

Las figuras 6 y 7 muestran, para algu nos valores de altura metacéntrica GM_T en cada buque, la influencia de la altura de ola y la influencia de la propia altura metacéntrica sobre dos variables de interés: El lapso que demora el buque en pasar de aproximadamente 5 grados de escora al ángulo máximo de balance producto de resonancia y la magnitud de los ángulos de escora máximos que se alcanzan en esos casos.

Algunas conclusiones

1. El fenómeno de resonancia paramétrica del balance transversal en olas longitudinales, en caso de presentarse, constituye realmente una situación muy peligrosa en buques como los prototipos, es decir, pesqueros menores y otros similares, como ya se ha mencionado.

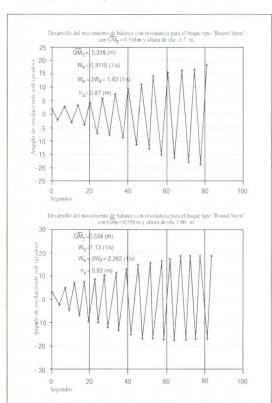


Figura 5

Las embarcaciones pueden alcanzar grandes ángulos de balance transversal en muy corto tiempo; en las figuras 6 y 7 se observa que para algunas formas de buques (como el prototipo "Trident", en este caso), en algunas alturas metacéntricas las olas (en estas combinaciones de encuentro entre buque y ola) pueden llevar al buque real desde ángulos de 4 ó 5 grados de balance a ángulos de 30 o más grados de escora en lapsos de poco más de 30 a 40 segundos.

Más aún, es necesario considerar el hecho de que en la navegación real del buque, a diferencia de las condiciones de laboratorio (Canal de Pruebas), existen varios efectos que pueden agravar más el fenómeno; por ejemplo, las fluctuaciones de fuerzas de viento actuando sobre la superestructura, golpes de las olas rompientes por amura o aleta y el que aún navegando con olas proa-popa (o popa-proa), éstas nunca están "perfectamente en línea" con crujía, como en el caso del modelo a escala, en que

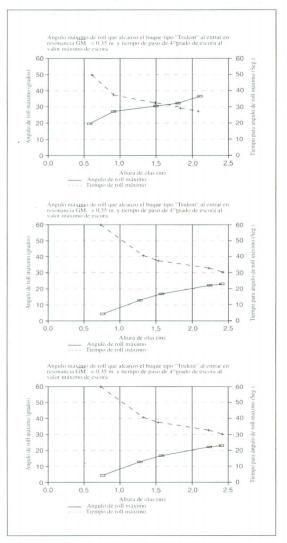


Figura 6

esto puede ser controlado y se puede preparar con calma y precisión la ocurrencia del fenómeno.

Por tanto, en el buque real los tiempos en que se desarrolla el fenómeno serán bastante inferiores aún, por lo cual pueden bastar unas pocas oscilaciones de roll, en unas pocas olas con esas relaciones de frecuencias de encuentro, y podrían generarse ángulos de balance que repentinamente crecerán sin clara comprensión especialmente para los tripulante.

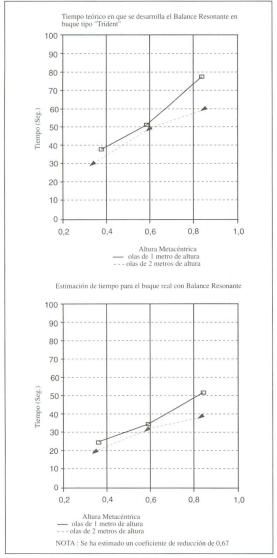


Figura 7

Esto puede dar poco tiempo a las tripulaciones para reconocer que el fenómeno podría estar comenzando a presentarse y tomar acciones para romper el brusco aumento de balance. Esto, que puede ser fácil y rápidamente evitado (por ejemplo, alterando la velocidad de avance) requiere que los tripulantes estén informados.

Puede esperarse el inicio de balance de gran magnitud al navegar con olas longitudinales o puede ocurrir bruscamente.

- 2. Comparando resultados de ambos cascos se observa que: Aquellas condiciones con bajos valores de altura metracéntrica son extremadamente vulnerables al fenómeno y que por tanto deberían ser especialmente tenidas en cuenta, tanto por las tripulaciones en la operación del buque como por los ingenieros en las etapas del diseño. Como es natural y queda demostrado aquí, las condiciones se ven agravadas en la medida que las olas incidentes tienen alturas mayores.
- 3. Se puede aquí verificar, en todos los casos, la hipótesis que surge del análisis de zonas inestables de Mathieu, de que la resonancia paramétrica de roll afecta más gravemente a aquellas embarcaciones cuyo plano de flotación varía mucho con la pasada de las olas longitudinales. En efecto, el prototipo "Trident" con popa de espejo y cuerpo de popa con pantoque quebrado o en V, es en todas las condiciones bastante más afectado que el prototipo "Round Stern", de popa crucero y cuerpo de popa con pantoque redondeado.

En este último, la forma de línea de agua y por ende la inercia de la misma permanece menos alterada al pasar sucesivas crestas y senos de ola a media nave y se puede verificar que tanto en valores altos de GM_T como en valores bajos, esta carena tiene resultados más benignos, es decir, el tiempo en que se desarrolla el aumento de balance, así como los ángulos máximos que se alcanzan, son inferiores, y que resiste en forma más pareja la resonancia causada por las olas bajas y altas.

- 4. De lo anterior se podría extraer algunas recomendaciones, como por ejemplo:
- Tener presente que el fenómeno de resonancia paramétrica del balance en las olas longitudinales es una amenaza latente de real peligro para este tipo de buques.
- Que es posible tomar algunas providencias en la etapa de proyecto, por ejemplo, calculando los porcentajes de aumento y disminución del coeficiente de restauración C_{44} transversal que causa una ola al pasar el seno y cresta, respectivamente, a media nave, y verificando que para distintas alturas de ola posibles estas fluctuaciones no sean excesivas. A este respecto es importante señalar que el ingeniero debe evaluar las variaciones de desplazamiento Δ y de altura metacéntrica, estudiando la pasada completa de

la ola a lo largo del casco "dinámicamente", es decir, debe irse actualizando en el dominio del tiempo la posición real del casco causada por sus oscilaciones verticales, oscilaciones de cabeceo, efecto Smith, diferencias de fase entre movimientos y ola, etc.

— Que en caso de no tener posibilidades de una evaluación como la anterior, al menos se haga una estimación de cuánto puede fluctuar la altura metacéntrica transversal, GMT, en su carena, al posicionar en quebranto una ola de una altura suficientemente grande, a media nave. Esto puede hacerse, entre otros, con el polinomio de Nechaev (ref. 14).

— Que en caso de tener variaciones muy grandes de restauración con la pasada de olas o, como se ha dicho antes, si se ha determinado que la altura metacéntrica transversal varía demasiado con posiciones arrufo-quebranto de la ola, por ejemplo, mayores que 25% o 30%, y dado que aún no existen métodos para cálculo o determinación teórica precisa de este fenómeno de resonancia, se solicite una revisión experimental con modelo a escala en tanque de pruebas, y verificar la magnitud de ángulo de balance que puede alcanzarse, especialmente en las condiciones de carga con menores alturas metacéntricas. Verificar además en cuanto tiempo se desarrolla la resonancia, es decir, cuánto tiempo o en cuántos períodos u oscilaciones el buque pasa de los pequeños ángulos de balance a los ángulos extremos de gran amplitud, lo que permite evaluar las decisiones respecto a tamaños, tipos, eficiencia, etc., de los estabilizadores que se hayan previsto.

REFERENCIAS

- 1. **Neves**, **Pérez**, **Sanguinett**i: "Estudio Analítico Experimental de la Estabilidad Dinámica de Buques Pesqueros en Olas Regulares", *Revista de Ingeniería Naval* Nºs 638-639, 1988, España.
- 2. Hoof, J.P.: Advanced Dynamics of Marine Structures, A Wiley Interscience Publ., 1982.
- 3. Neves, M.A.: "Dynamic Stabilyty of Ships in Waves", Ph D. Tesis, Univ. of London, 1981.
- 4. **Paulling, J.R.**: "Transverse Stability of Ships in a Longitudinal Seaway", Proc. Int. Conf. Stability of Ships, Glasgow, 1975.
- 5. Morrall, A.: "Capsizing of Small Trawlers", Tran. RINA., vol. 122, 1980.
- Inglis, R.: "A three-Dimensional Análisis of the Motion of a Rigid Ship in Waves", Univ. of London, 1981.
- 7. Himeno, Y.: "Prediction of Ship Roll Damping", DNAME, Univ. of Michigan, Rpt. 239, 1981.
- 8. White, J.A.: "Methods for Evaluating the Safety of Ships of Different Routes", U.S.C.G., R&D Center, 1991.
- Salas, M.: Limites de Estabilidade de Pesqueiros em Frecuências Resonantes", coppe, Univ. Federal o Río de Janeiro, 1991.
- Neves, M.A.: "A Questao da Seguranca no Mar", Rev. Portos e Navios № 374, Rio de Janeiro, 1991.
- 11. **Pérez, N.**: "Comportamiento del Buque en el Mar", Instituto de Ciencias Navales y Marítimas, Facultad de Ciencias de la Ingeniería-U.A. de Chile, 1992.
- 12. Battacharrya, R.: "Dinamics Of Marine Vehicles", Annapolis Acad., USA, 1978.
- Pérez, Almendra, Sanguinetti, Alvarado: "Algunos Resultados Experimentales de Resonancia Paramétrica...", 3er Congreso Nacional de Ingeniería Naval en su Proyección Oceánica, IPIN-CHI-LE, mayo de 1993.
- 14. O'Dogherty: Revista de Ingeniería Naval, España, 1974.
- 15. **SNAME**: "Principles of Naval Architecture", USA, 1967 o edic. 1989.

