

EXCITACION PARAMETRICA DE ROLL EN OLAS LONGITUDINALES

Nelson Alejandro Pérez Meza*

Resumen

Se analiza aquí uno de los aspectos de mayor relevancia (para la seguridad operativa de buques pesqueros: la estabilidad del movimiento de roll u oscilación transversal en olas longitudinales (por proa o popa) bajo la presencia de resonancia paramétrica. El análisis se hace sobre la base de resultados experimentales realizados por el autor en el tanque de pruebas de Valdivia, usando modelos en escala reducida de buques pesqueros típicos.

Introducción

Todo aquel que se desempeña en áreas relacionadas con proyecto, diseño, clasificación u operación de buques de pesca tiene siempre una mayor exigencia de proporcionar altos niveles de seguridad operativa a este tipo de buques.

Como es sabido, su perfil de misión lo lleva siempre a exponerse a un mayor peligro trabajando con estados de carga muy variables, recibe su carga en alta mar operando con escotillas abiertas y, por su tamaño, es afectado por el estado de la mar con mucha mayor rigurosidad que cualquier otro tipo de buque mercante.

El tratamiento habitual de la estabilidad en un proyecto es normalmente simplificada al mero cálculo de la estabilidad (intacta) estática en aguas tranquilas (es decir, sin olas).

Para buques de más de 24 metros de eslora existen algunas regulaciones establecidas en la Torremolinos International Convention for the Safety of Fishing Vessels, de 1977, suscrita por delegaciones técnico-diplomáticas de 45 países, entre cuyos signatarios está también Chile. Esta convención fue, como sabemos, patrocinada por OMI-ONU.

Las regulaciones referidas abordan aspectos diversos, tales como: Construcción, subdivisión estanca, instalaciones, protección v extinción de incendios, protección de la tripulación, equipos de salvamento, equipos de comunicaciones y de navegación, estabilidad transversal.

Las regulaciones sobre estabilidad transversal se limitan a establecer valores mínimos en base a la curva de brazos de estabilidad trazada en función de los diferentes ángulos de escora. (Valores mínimos para altura metacéntrica inicial, para el área bajo la curva, para el ángulo de escora donde ocurre un máximo en la curva de brazos, etc.).

Pero, como ya se sabe y como ha sido dicho antes, estas han sido formuladas asumiendo una escora estática en la embarcación posicionada en aguas también estáticas y es claro para todos que el buque enfrentará olas la mayor parte de su vida operativa y será en esas condiciones, en particular en las de mayor "agitación", en las que se requerirá salvaguardar su estabilidad.

De estos breves comentarios se deduce entonces fácilmente que: a) La estabilidad no puede garantizarse cuando se determine así, en términos de un problema estadístico; b) lo que debe importar es la estabilidad del movimiento oscilatorio, o sea, la estabilidad tratada comba el problema dinámico que realmente es.

* Ingeniero (E) en Construcción Naval; M. Sc. en Ingeniería Oceánica.

Como los criterios de estabilidad y sus regulaciones no tratan el problema en forma correcta teóricamente, tampoco generan siempre resultados confiables para la práctica y es así como periódicamente se producen volcamientos o naufragios de embarcaciones pesqueras operando en olas, a pesar de satisfacer los mínimos valores exigidos por estas regulaciones.

Queda así entendido que el problema que debe ser rescatado es el de la estabilidad de los movimientos en olas en los buques, en general. El análisis teórico de cual será la respuesta o comportamiento del buque en olas es de bastante complejidad matemática y, como se sabe, los sistemas de ecuaciones diferenciales que resultan son prácticamente imposibles de resolver, a no ser que se realicen sucesivas simplificaciones y aproximaciones, las cuales una vez hechas pueden permitir solucionarlas y calcular, por ejemplo, cuál sería la respuesta estimada del movimiento del buque ante la acción de tal o cual estado de oleaje, permitiendo así una cierta evaluación del comportamiento o desempeño que pudiera esperarse de un determinado diseño. La precisión, naturalmente, depende de qué tipo de simplificaciones o aproximaciones se hayan hecho.

El tratamiento teórico generalmente requiere de coeficientes y factores que deben estar disponibles como datos de entrada. Estos, a su vez, son obtenidos mediante extensas y costosas investigaciones y por ende es factible encontrar información para aquellos tipos de buques que son de mayor interés en los países que realizan esas investigaciones (cargueros, tanques, contenedores, etc.).

No existe gran información para buques de pesca, aun considerando que año a año entra en operación una mayor cantidad de estas embarcaciones.

En nuestro país, el sector ha tenido un alto desarrollo en los últimos años, en tamaños de eslora entre 15 y 45 metros (pesca industrial) y artesanales con esloras de entre 10 y 15 metros, aproximadamente.

Naturalmente, puede intuirse que no son tamaños que comercialmente interese investigar en los países de alto desarrollo en industria naval.

Así, una excelente solución es usar técnicas experimentales, es decir, realizar una simulación a escala en un tanque de pruebas, midiendo en cada caso la o las respuestas de interés que se pueden esperar en un nuevo diseño o en una modificación a un proyecto actual.

Para la flota que es proyectada y construida en Chile en el sector pesquero esto es perfectamente factible usando, por ejemplo, las instalaciones que posee el Departamento de Construcción Naval en Valdivia, como lo es el Canal de Pruebas, equipado con un sistema ad hoc generador de olas que permite una gran variedad de análisis.

En general, se puede decir que la situación mas desventajosa a que podría quedar expuesto un buque pesquero es a la acción de olas que inciden por su costado.

Conocer qué escora puede tomar un buque de este tipo ante la acción de tal o cual oleaje incidiendo por su costado, es uno de los problemas que puede ser estimado con cierta aproximación en forma teórica mediante un calculo numérico manual o por computador; también puede ser conocida esta reacción o respuesta que tendrá el buque realizando mediciones en el Canal de Pruebas (por ejemplo, lo que en Ingeniería Naval denominamos R.A.O. en *roll*).

Podría pensarse entonces que si la respuesta del buque en olas, para la situación más desventajosa, es suficientemente aceptable, en otra situación será aun mejor, como por ejemplo, en la situación de olas longitudinales no sincrónicas con la velocidad del buque (es

decir, las longitudinales que se desplazan a una velocidad distinta a la del buque, pues ya es sabido que cuando el buque navega sobre una cresta de ola pierde parte de su capacidad de estabilizarse, por una disminución de altura metacéntrica y, viceversa, en un seno de ola).

Como se explicaba, podría parecer ésta (situación de olas longitudinales) como la más benigna para el movimiento de oscilación transversal o roll en el buque. Sin embargo, un fenómeno que por poco conocido ha sido escasamente analizado y que puede representar un serio peligro de naufragio es el de la resonancia paramétrica del movimiento de roll en olas incidiendo longitudinalmente.

Generación de resonancia paramétrica de roll en olas longitudinales

Cuando el buque pasa a través de una ola longitudinal, es sabido que existen posiciones relativas entre el buque y la cresta de la ola, en que la estabilidad aumenta y otras en que la estabilidad disminuye.

La causa general de esto es que según la posición de la ola a lo largo del buque se modifica el volumen sumergido y la forma del área de la línea de flotación; esto, por su parte modifica el valor de la altura metacéntrica y así el momento de adrizamiento ($\Delta * GM * \Phi$) toma valores mayores o menores que el valor que tiene en aguas tranquilas.

Así entonces, si una ola incide por proa o popa al buque con una frecuencia cualquiera de encuentro ω_e , el momento adrizante ya no sería:

$Ma = \Delta * GM * \Phi$ (para aguas tranquilas)
sino que sería:

$$Ma(t) = [\Delta * GM + \delta (\Delta * GM) \cos \omega_e t] \Phi$$

Ma = momento adrizante en roll

Φ = ángulo de roll

Δ = desplazamiento del buque

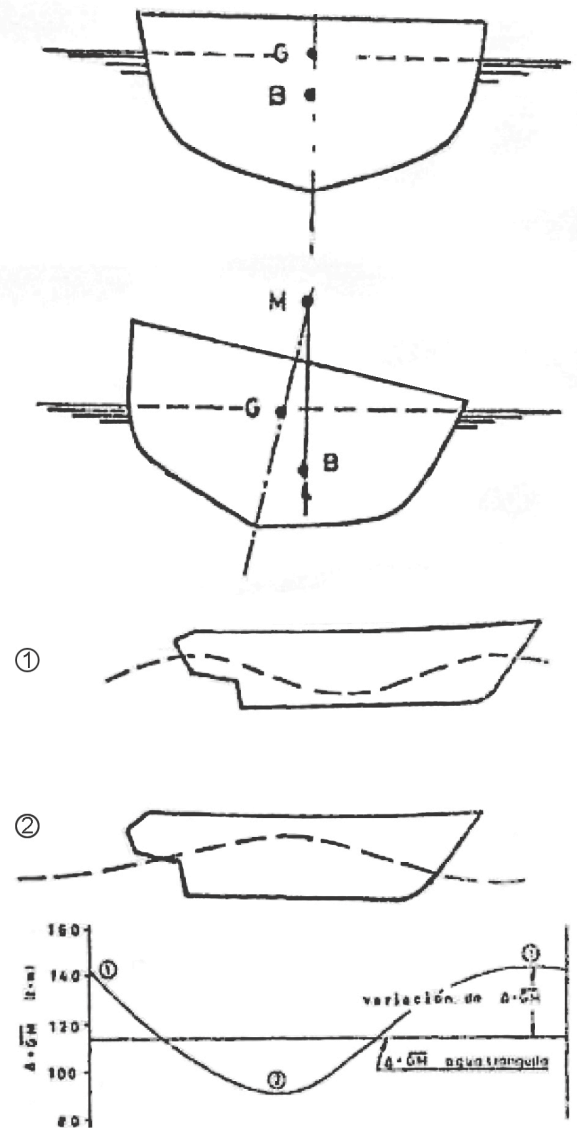
GM = altura metacéntrica

$\delta (\Delta * GM)$ = variación de $\Delta * GM$ producido por la pasada de la ola.

En la figura 1 se puede observar este efecto en el buque pesquero *Trident* (usado como pesquero tipo, de casco en V, en este trabajo).

Si esta variación ocurre junto con situaciones especiales de excitación de las olas incidentes, puede generarse la denominada resonancia paramétrica, llamada así porque depende directamente de la variación del parámetro momento de adrizamiento.

Figura 1. Variación de $\Delta * GM$ al pasar la ola a lo largo del casco en V (Pesquero *Trident*)



En breves palabras, estas situaciones especiales se resumen en que si el buque sufre una pequeña escora en el momento en que la cresta de la ola está a media nave y, de acuerdo a la figura 1, con menor estabilidad, al seguir avanzando la ola a lo largo del buque este luego flotará con un seno de ola a media nave y por consiguiente su estabilidad habrá aumentado al mismo tiempo que la cresta de la ola "empuja" la cara escorada de proa y popa; si encuentra al buque en el momento en que se restaura o regresa a su posición vertical adrizada, este movimiento de regreso a la vertical será a velocidad angular muy alta, pasando a escorarse con mayor intensidad ahora hacia la otra banda del buque en el momento en que el se encuentra con otra cresta de ola a media nave (y por ende, con menor estabilidad nuevamente), alcanzando así un ángulo de escora mayor que el inmediatamente anterior. Si este proceso continúa, el buque alcanzaría ángulos de escora cada vez mayores, es decir, entraría en resonancia.

Análisis experimental

En este trabajo se ha usado dos buques pesqueros tipo y representativos de buques como los usados en las flotas de Chile y que aquí denominamos como *Trident* y *R. Stern*, muy usados como cascos en investigaciones, pues tienen características prácticamente semejantes pero difieren en la forma del casco, siendo el primero de casco en V y el segundo de casco redondo.

Sus principales características son:

	"Trident"	"R. Stern"
LoA (m).	25,91	24,36
L _{BP} (m)	22,09	21,44
B (m)	6,86	6,71
D (m)	3,35	3,35
T (m)	2,48	2,49
Δ (t)	170,30	162,60

En las figuras 2 y 3 se observa ambos buques. Los experimentos con modelos a escala 30 para ambos buques, realizados en el tanque de pruebas de Valdivia, pretenden verificar cuán relevante o peligroso puede realmente ser este fenómeno y analizar tanto la magnitud de oscilación como su desarrollo en el tiempo y comparar los resultados obtenidos.

La semejanza dinámica de los ensayos queda resguardada manteniendo iguales números de Froude entre buques y olas reales y los modelos a escala. Estos últimos, a su vez, además de ser geoméricamente similares a los cascos reales tienen reproducidos a escala: La masa, las posiciones longitudinales y verticales de los centros de gravedad reales y los radios de inercia transversales y longitudinales.

En nuestro caso y por problemas técnicos de las instalaciones del tanque de pruebas, la frecuencia con que el buque encuentra a las crestas de las olas al estar navegando, o sea, la frecuencia de encuentro ω_e , se simuló manteniendo el modelo con velocidad 0 y haciendo incidir en él olas cuya frecuencia propia era igual a la frecuencia de encuentro buque-olas.

Algunos resultados medidos permiten mostrar que el fenómeno es de alta relevancia. Las figuras 4 y siguientes permiten sacar algunas conclusiones.

Las frecuencias de encuentro en las cuales se espera que ocurra este fenómeno se pueden identificar partiendo de la ecuación desacoplada de *roll* puro, que incluye el término de restauración variable con **t** y que, como es sabido, tendría la forma siguiente:

$$I_v \frac{d^2\Phi}{dt^2} + B \frac{d\Phi}{dt} + [\Delta * GM + \delta (\Delta * GM) \cos \omega_e t] \Phi = 0$$

I_v = inercia virtual en *roll*

$\frac{d^2\Phi}{dt^2}$ = aceleración angular del movimiento de *roll*

Φ = ángulo de escora en *roll*

B = coeficiente de amortiguación del casco

$\omega_e t$ = frecuencia de encuentro buque-ola

$\frac{d\Phi}{dt}$ = velocidad angular del movimiento de *roll*

Esta ecuación es no lineal y no tiene solución factible, pero reducida a una forma como la de Mathieu indica que las frecuencias en donde se presentaría este fenómeno serían:

$$\omega_e \frac{2}{n} \omega_\Phi \quad n = 1, 2, 3...$$

$$\text{o bien} \quad T_\Phi \frac{2}{n} T_e \quad n = 1, 2, 3...$$

ω_Φ = frecuencia natural de oscilación del buque en movimiento de *roll* en aguas tranquilas

T_Φ = período natural de *roll* del buque

ω_e, T_e = frecuencia y período de encuentro entre buque y ola, respectivamente.

Es decir, son períodos de encuentro peligrosos, principalmente porque:

$$T_e = \frac{1}{2} \text{ (Período de } \textit{roll} \text{ del buque)}$$

$$T_e - 1 = \text{ (Período de } \textit{roll} \text{ del buque)}$$

los demás valores generalmente no se encuentran en olas del mar.

Naturalmente, las olas deben tener altura suficiente para excitar esta resonancia y esto es variable de buque a buque, pues en el fondo dependen de cuál es el cambio en el valor de la altura metacéntrica GM que la pasada de la ola a lo largo del buque genere (es decir, de $\delta (\Delta * GM)$).

Puede pensarse que este fenómeno es de interés sólo para un mar de aspecto regular; sin embargo, esto no es así.

La excitación se produce también en mar irregular, pues para ello basta que en el espectro existan olas con las frecuencias o períodos de encuentro mencionados como peligrosos para que pueda iniciarse esta resonancia de balance transversal, la cual hará aumentar la oscilación transversal de banda a banda hasta llegar a un régimen permanente en que el buque no continúa aumentando su ángulo de balance o bien puede continuar hasta llegar a hacer agua en cubierta o inclusive, en el peor de los casos, volcar.

En el mejor de los casos, por otra parte, esta resonancia o aumento sucesivo del *roll* se puede destruir al encontrar olas de diferente frecuencia que la peligrosa (o período de encuentro), lo cual detiene, como se dijo, el crecimiento del balance y estabiliza el buque.

Conclusiones y comentarios

Al observar los resultados medidos en el tanque de pruebas de Valdivia y mostrados en las figuras precedentes, se puede decir que la condición en que la frecuencia de encuentro del buque con las olas es igual al doble que la frecuencia natural propia del buque en balance (o sea, $\omega_e = 2 \omega_\phi$), parece ser bastante más peligrosa que la condición en que $\omega_e = \omega_\phi$, pues presentó para ambos buques grandes amplitudes de ángulo de escora en balance (debe recordarse que $\omega_e = 2 \omega_\phi$ es equivalente a decir $T_e = 1/2 \times T_\phi$), o sea, la situación más peligrosa para estos buques será cuando el período, en segundos, que el buque demora en encontrar dos crestas sucesivas es la mitad del período, en segundos, con que oscila el buque en roll.

Al comparar los resultados para los dos cascos probados es perceptible que el casco en V es más excitable en este fenómeno que en el casco redondo. El casco en V, a pesar de haber sido dotado de quillas de balance y de tener una altura metacéntrica mayor (es decir, mayor estabilidad estática), se mostró bastante más vulnerable a la resonancia.

Si se piensa en la gran similitud entre los dos cascos, en lo referente a sus características principales, la justificación de un comportamiento tan distinto estaría en las formas, principalmente de la popa, tipo "espejo" en el casco en V y popa "cruceiro" en el de casco redondo.

La excitación paramétrica de este fenómeno resonante, como se ha dicho antes, es altamente dependiente de la variación periódica de la altura metacéntrica, debido a las sucesivas pasadas de crestas y senos de ola a media nave, lo que a su vez depende de la variación de la forma de la línea de flotación. Esto parece indicar que la popa de "espejo" y casco en V favorecen una variación muy brusca de la forma de la flotación en popa, generando así una mayor desestabilización de los cascos cuando ocurre este fenómeno.

Este hecho sugiere la conveniencia de analizar o solicitar se analice en la etapa de proyecto el comportamiento que podría esperarse de las embarcaciones del tipo como la descrita aquí como casco en V y popa "espejo". Esto puede hacerse experimentalmente en tanques de prueba que tengan facilidades para ensayos en olas a escala.

A este respecto, los buques de guerra, o , por lo menos algunos tipos de ellos, pueden por esta causa verse expuestos al fenómeno dada su configuración de popa. Algunos resultados fueron presentados en conjunto por el autor de este artículo y otros dos profesores de Chile y Brasil, al último Congreso de la Sociedad de Ingeniería Naval del Brasil, en Río de Janeiro en 1986, obteniendo el premio al mejor tema presentado —aplicable a buques de guerra— otorgado por los arsenales de Marina del Brasil. Esto sólo viene a corroborar la importancia de mantener el fenómeno bajo control o por lo menos conocer la respuesta que el buque tendría si esto se presenta.

A su vez, conocer el fenómeno y reconocerlo cuando se llegue a presentar en la operación del buque puede permitir a la tripulación salir de esa peligrosa sincronización con las olas, que en un lapso muy corto puede llevar a grandes escoras. Una forma simple de cortar esta resonancia será alterar la velocidad del buque, pues al aumentarla o disminuirla se alterará la frecuencia o período de encuentro con las olas. No se obtiene el mismo resultado al alterar el rumbo, pues el fenómeno se presenta con igual peligrosidad en ángulos de rumbo próximos a la dirección proa-popa de las olas.

BIBLIOGRAFIA

- OMI: Torremolinos International Convention for the Safety of Fishing Vessels, 1977.
- **Sanguinetti, C.F.O.:** "Estabilidade dinamica de navios pesqueiros em ondas regulares", Tese M.Sc, COPPE-UFRJ-1985.
- **Perez, N.A.:** "Desenvolvimento de algumas tecnicas experimentais em ondas regulares", COPPE-UFRJ-1985.
- **Blocki, W.:** "Ship safety in connection with parametric resonance of the roll", ISP-1980,
- **Neves, M.A.S.:** "Estudo dos efeitos das ondas na estabilidade dinamica dos navios", Sobena, Brasil, 1982.
- **Bishop, Neves y Price:** "On the dynamics of ship stability", RINA, S.M., London, 1981.
- **Neves, Perez, N.A. y Sanguinetti:** "Estudo experimental de estabilidade em ondas nos barcos pesqueiros", Sobena, 1986.
- **Conceicao y Neves:** "Stability of intact ships in waves", VIII IPIN Congress, Washington D.C, 1983.
- **Morral, A.:** "Capzising of small trawlers", TRAS, RINA, 1980.

