

# ESTABILIDAD TRANSVERSAL DEL BUQUE

Nelson A. Pérez Meza\*

De una manera general, se puede decir que todas las estructuras flotantes son proyectadas para operar en forma eficiente y segura.

A este respecto, la estabilidad de sus movimientos puede ser de fundamental importancia. En el caso particular de buques, ciertamente, la estabilidad transversal es de gran importancia y ha sido motivo de gran interés por parte de los expertos.

El desarrollo general de la teoría de estabilidad de buques ha tenido un largo período de evolución; sin embargo, está aún lejos de ser completamente satisfactoria o completa.

Los diversos aspectos del problema han sido abordados históricamente.

- 1746. Pierre Bouguer definió el radio metacéntrico (BM) como la relación entre el momento de Inercia (I) del plano de flotación y el volumen sumergido (V); esto es:

$$BM = I/V$$

Así, la altura metacéntrica era usada como una medida de la estabilidad, estando ésta dada por la ecuación:

$$GM = KB + BM - KG \quad (1)$$

donde KB es la coordenada vertical del centro de flotabilidad y KG la coordenada vertical del centro de gravedad.

A su vez, el brazo de restauración era estimado como:

$$GZ = GM \sin \phi \quad (2)$$

siendo  $\phi$  el ángulo de escora; en radianes.

- 1796. Atwood derivó su fórmula para el brazo de restauración:

$$GZ = \frac{v h_1 h_2}{V} - BG \sin \phi \quad (3)$$

siendo v el volumen de la cuña,  $h_1 h_2$ ; el brazo de transferencia del volumen de cuña y BG la distancia entre el centro de flotabilidad y el centro de gravedad.

- 1850. Canon Mosely introduce la idea de estabilidad "dinámica". El derivó la expresión para el trabajo mecánico realizado por el buque bajo la influencia de alguna fuerza externa. Expresó el trabajo como el área bajo la curva de momentos de restauración. Así, el buque era considerado como estable si:

$$\int_0^{\phi_{\text{máx}}} (M_r - M_e) d\phi > 0 \quad (4)$$

---

\* El autor es ingeniero (E) en Construcción Naval, M. Sc en Ingeniería Oceánica y profesor del instituto Profesional de Valdivia.

$M_r$  = Momento de restauración, función de  $\phi$

$M_e$  = Momento escorante, función de  $\phi$

$\phi_{\max}$  = ángulo máximo de escora

• 1861. Barnes presentó un método numérico para calcular las curvas cruzadas de estabilidad y otros procedimientos de cálculo.

• 1904. Scribanti derivó una expresión para GZ en buques de costados rectos, en donde:

$$GZ = \frac{(GM + BM) \text{tg}^2 \phi}{2} \text{sen } \phi ; \quad (5)$$

Todos estos estudios pueden agruparse como basados en estabilidad en aguas calmas, análisis convencional de estabilidad del buque, de tipo estático o cuasi estático.

Existe otro tipo de estudios sobre la estabilidad, basados más bien en estabilidad de movimientos del buque, siendo los más relevantes:

• 1861. W. Froude propuso una expresión para movimiento de balance (*roll*) en mar transversal regular. En esta derivación se despreció el efecto de *damping* o amortiguación, y se asumía una serie de simplificaciones, entre las cuales se puede mencionar que la manga y el calado del navío eran muy pequeños respecto de la longitud de onda de las olas, y también que la presencia del buque no alteraría la forma de las olas incidentes.

Posteriormente, en 1874, incluyó efecto de *damping* fluido.

• 1896-1898. A.N. Krylov presenta un análisis teórico de oscilaciones del buque y la teoría del movimiento de rolido o balance que formó la base de la conocida hipótesis Froude-Krylov.

• 1939. G.C. Manning adiciona a los análisis propuestos a partir de Krylov, el efecto de la velocidad del buque y dirección de las olas, así como del período de encuentro de las olas.

• 1953. St. Denis y Pierson presentan su análisis relativo a una aproximación estadística para el estudio de movimiento o comportamiento de buques en mar irregular, que abrió un interesante campo de estudios que se ha venido desarrollando hasta la fecha, y que es conocido como teoría espectral para comportamiento en olas.

• 1937. Dohlman estableció el importante concepto de que en toda pérdida o volcamiento de una nave se tiene una situación eminentemente dinámica, que no es posible caracterizar una situación de equilibrio estático en olas y no es adecuado analizar con la forma cuasi estática habitual. Posteriormente, O. Grim mostró, en sus estudios (1952-53), la posible influencia de resonancia involucrada en pérdida de estabilidad, tema muy analizado por diversos investigadores (Vedeler, Rosenberg, Paulling, etc.),

Actualmente, y derivado de análisis experimentales, existe cierta concordancia en clasificar cuatro modos principales de volcamiento en olas.

— Pérdida simple de estabilidad causada por mar de popa, con olas que se desplazan en fase con velocidad del buque o bien, con velocidades muy cercanas. La situación de cresta de ola a media nave será especialmente crítica al generar una fuerte baja del valor de GM y, por ende, de GZ.

— Resonancias, caracterizadas por un movimiento de balance oscilatorio creciente, que se acentúa rápidamente, por ejemplo, debido a la pasada de sucesivas crestas y senos de olas en la posición de media nave; o por posiciones de arrufo y quebranto, que generan

sucesivas y bruscas pérdidas y aumentos de brazos de restauración, o por sincronismos simples en olas, haciendo que el movimiento de balance entre en resonancia. Esta situación es muy compleja, pues en la práctica también están presentes otros movimientos excitatrices, como *heave* y *pitch*, que causan resonancias —llamadas paramétricas— por acoplamientos, para diferenciarlas de las paramétricas causadas por las olas.

—*Broaching*, caracterizado por una rápida pérdida de estabilidad direccional, cuando la nave, especialmente menores, quedan en situación de *surfing* desde una cresta al seno de la ola.

Es común en mar de popa y en olas cuyas velocidades son similares a las del buque, causando que la nave vuelque al quedar "atravesada" entre cresta y seno de la ola.

Complementariamente, se puede citar también el problema en olas de través; sin embargo, técnicamente no se le da la misma importancia pues normalmente es una situación evitada por cualquier marino, ya que su peligrosidad se intuye fácilmente, no así los otros tres modos, que son sorprendidos y rápidos.

—*Lurching*: caracterizado por ángulos de banda muy grandes que se presentan repentinamente en ciertas frecuencias de encuentro del buque en olas, debido a un problema de histéresis que se presenta en el R.A.O. o respuesta de roll del buque en olas (ángulos de escora mayores de 10-12 grados).

El método propuesto inicialmente para cálculo del primer tipo o modo de pérdida mencionado fue determinar la curva de restauración del buque posicionado en una cresta de onda a media nave, en su perfil longitudinal, simulando la situación física del navío navegando en olas de popa cuya velocidad es similar a la del navío, es decir, período de encuentro muy alto con las olas (cuasi sincronismo).

De experiencia con modelos, Nechaev estudió la pérdida de brazo de restauración o adrizamiento para el navío posicionado en cresta de ola a media nave. Representando la pérdida de brazo por  $\delta GZ$ , Nadeinski y Jens indican la siguiente expresión para calcular esta pérdida de brazo adrizante.

$$\delta GZ = - B \sum_{i=1}^{i=7} A_i f_i(\phi) \quad (6)$$

siendo:

B = manga del buque

A<sub>i</sub> = funciones de las formas de buque y de la ola

f<sub>i</sub>( $\phi$ ) = funciones del ángulo de escora y número de Froude del buque.

En opinión de los autores, el error expresado no superaría el 10%.

Los valores de A<sub>i</sub>, así como los de f<sub>i</sub>( $\phi$ ), se pueden encontrar en detalle para su uso en cálculo de aplicación, en diversas publicaciones.

Los resultados de este tipo de cálculo muestran una muy fuerte pérdida de estabilidad, lo que en general no fue considerado ciento por ciento como real. Nuevamente se tiene que no es fácil simular una situación eminentemente dinámica. En este caso hay efectos dinámicos importantes que no están presentes en ese tipo de cálculo; uno de ellos es el

efecto Smith, causado por el movimiento orbital de las partículas componentes de la ola, alterando la distribución de presiones alrededor del casco.

Estudios que adicionan estos efectos han sido realizados por Arndt, Roden y Paulling.

En 1952 se propuso una de las primeras expresiones para el análisis del momento de restauración en olas. O. Grim consideró la siguiente ecuación del movimiento de rolido o balance, la cual no considera amortiguación, y que siendo homogénea vale sólo en aguas tranquilas.

$$I \phi'' + \Delta (GM + \delta GM \cos wt) \phi = 0 \quad (7)$$

$I$  = Momento de inercia de masa virtual respecto al eje de rotación ( $I$  = Inercia de masa + Inercia adicional)

$\Delta$  = desplazamiento

$GM$  = altura metacéntrica

$\delta GM$  = variación máxima de  $GM$  con la ola

$w$  = frecuencia de encuentro de la ola

$t$  = tiempo

$\phi$  = ángulo de escora en roll

$\phi''$  = aceleración angular en roll ( $\phi = \frac{d^2 \phi}{dt^2}$ )

Posteriormente modificó su proposición a:

$$I \phi'' + \Delta GZ \phi = M_{(t)} \quad (8)$$

$M_{(t)}$  = momento excitatriz de la ola

La excitación sería causada por el periódico cambio de la forma de la carena del buque con el paso de olas en la dirección de avance de éste, tomando posiciones a lo largo de su eslora.

Se produce así una variación periódica del centro de flotabilidad, lo que conlleva una variación en la posición del metacentro, como se observa en la figura 1.

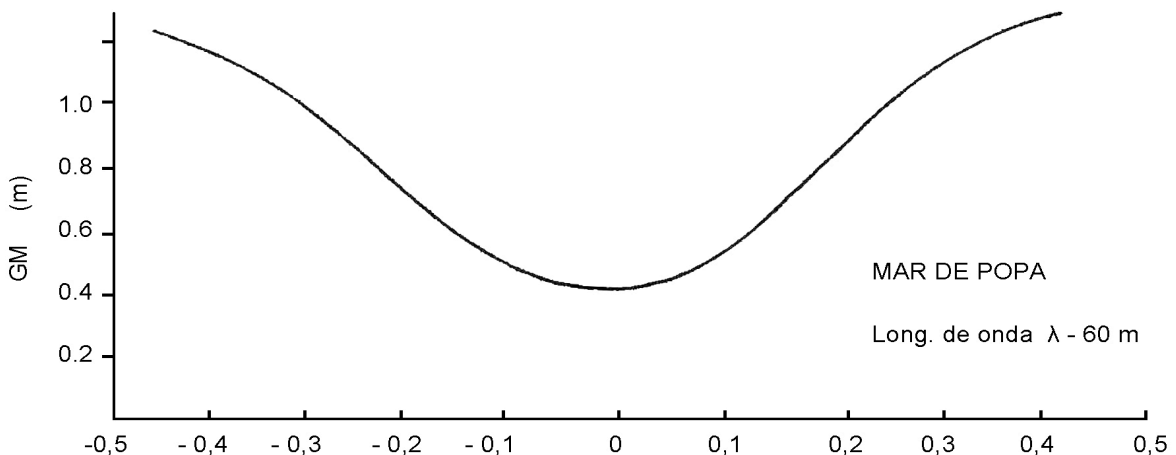


Figura 1  
POSICION DE CRESTA EN LA ESLORA

En ella se ve claramente la variación de GM desde un máximo cuando la posición es de arrufo, hasta un valor mínimo en quebranto (cresta de ola en L/2).

Otros autores, como Wendel (1954), Kerwin (1955), Abicht (1975), han puesto el énfasis —en sus publicaciones— en esta forma de tratar el problema llamada de excitación paramétrica. Los análisis teóricos, en general, se han basado en la forma de definir el movimiento de *roll* (balance), según la ecuación de Mathieu, ya que la ecuación (8) se puede llevar a la forma de la ecuación (9) mediante transformaciones convenientes.

$$\frac{d^2 \phi^*}{d\tau^2} + (a + 2s \cos 2\tau) \phi^* = 0 \quad (9)$$

$$a = \frac{4 \rho g \nabla GM_m}{I_v W_E^2} \quad (10)$$

$$s = \frac{2 \rho g \nabla \delta GM}{I_v W_E^2} \quad (11)$$

$\nabla$  = volumen desplazado

$I_v$  = momento de inercia de la masa virtual

$\rho$  = densidad de masa del agua

$g$  = aceleración de gravedad

$GM_m$  = valor medio de la  $GM = f(t)$

$\delta GM$  = variación máxima (o amplitud de variación) del GM con olas.

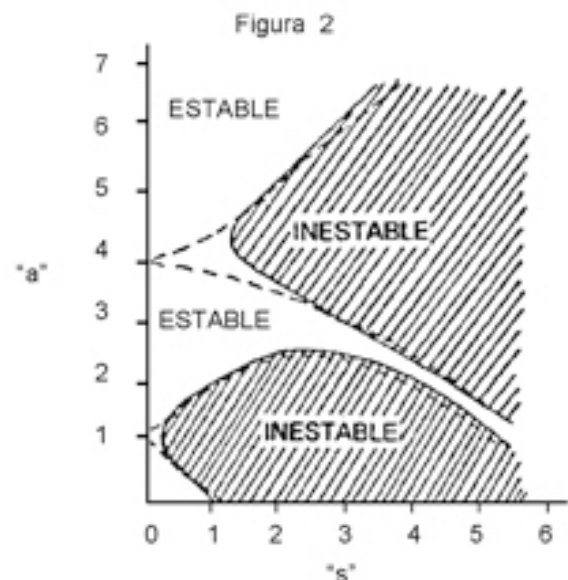
$W_E$  = frecuencia de encuentro del buque con la ola

$t$  = tiempo

$\tau = 1/2 W_E t$

La solución de esta ecuación mostrará zonas de estabilidad y de inestabilidad, dependiendo de los valores de "a" y de "s". Aquí, inestabilidad, sin embargo, no necesariamente significa volcamiento de la nave pues se ve que la ecuación es lineal, y por tanto representa la situación de movimiento de balanceo en pequeños ángulos de escora; en ángulos mayores la ecuación pierde validez. Es decir, esta ecuación puede tomarse como una aproximación de alerta para la situación que se esté analizando, la que puede considerarse como de peligro si está en la zona de inestabilidad.

La figura 2 muestra la zona de estabilidad e inestabilidad en la solución de la ecuación de Mathieu, que representa el movimiento de *roll* puro.



Rosemberg demostró que las mismas situaciones se presentan, cuando la ecuación incluye amortiguación (del casco o quillas de balance, etc.), en ese caso, la ecuación (8) queda como sigue:

$$I \phi'' + b \phi' + \Delta(GM + \delta GM \cos wt) \phi = M_{(t)} \quad (12)$$

La ecuación de Mathieu fue comparada con resultados experimentales de dos modelos de 1,25 metros de eslora, por Kerwin, quien encontró que aun cuando se podían generar grandes oscilaciones de *roll* en olas de popa de características moderadas, esta era una situación de ocurrencia lenta. Esta conclusión de Kerwin contrasta con los resultados de ensayos realizados por Paulling para la U.S. Coast Guard, con modelos libres en aguas abiertas, el cual registró volcamientos rápidos, después de ser actuado el modelo por tres olas solamente.

Evidentemente, en el caso de mar de aleta (*quartering*) se generan roídos de gran amplitud, más rápidamente que en mar de popa (*following*), debido a la adición de un momento escorante de las propias olas en un cierto ángulo respecto al eje diametral del buque.

La importancia de estas proposiciones como aproximación a la solución del problema de estabilidad radica en el hecho de relacionar el problema de la estabilidad transversal con los movimientos del buque; pues esta idea forma la base de la mayoría de los estudios e investigaciones efectuados hasta la actualidad.

Actualmente existen proposiciones analíticas más desarrolladas para el ecuacionamiento del problema del movimiento de balance lineal. Neves ha presentado algunas de estas expresiones: estudiando el problema de estabilidad; analizando movimientos del buque en olas; o partir de ecuaciones similares a:

$$(Ix + A) \phi'' + B\phi' + \Delta GM_{(t)} \phi = M_{\text{excitatriz}}$$

A = coeficiente de masa adicional en balance

B = coeficiente de amortiguación hidrodinámica

GM(t) = variación del GM en olas

$\phi, \phi', \phi''$  = ángulo, velocidad y aceleración en roll

Más recientemente, los análisis teóricos de movimientos y su relación con el problema de estabilidad transversal y roído se han vuelto cada vez más complejos, pues la propia complejidad del fenómeno requiere la utilización de ecuaciones combinadas de movimientos, o de movimientos acoplados, para una aproximación más realista al problema.

Bishop, Neves, Price, han hecho proposiciones en que se analizan los problemas dinámicos relacionados con estabilidad y respuesta del buque en roll con movimientos acoplados de *sway* y *yaw*, intentando ver si un análisis lineal del problema es adecuado y en qué circunstancias no sería recomendable. Se observa allí la íntima reacción entre estabilidad direccional y estabilidad transversal, habitualmente vistas como prácticamente sin conexión en los desafíos.

Kuo y Odabasi han efectuado análisis sobre la base del método propuesto por Lyapunov en 1892. En este método se define una función de energía llamada "función de

Lyapunov", y el concepto de estabilidad es definido como el hecho de permanecer el buque con amplitud de movimiento dentro de un valor previamente establecido.

Si el valor de la función de Lyapunov es cero o mayor que cero y su cambio con el tiempo es nulo, el movimiento será estable; aunque esta forma de análisis está aún en desarrollo, hay evidencias que sugieren sus posibilidades de uso exitoso, como ya ha ocurrido en aviación.

Ultimamente, incluso se ha usado una aproximación matemática como la teoría de catástrofe de Thom; que describe cambios de forma de naturaleza cuando fuerzas que cambian gradualmente producen efectos repentinos; Zeeman usó esta teoría para el análisis de estabilidad y volcamiento de un buque; sin embargo, autores como Kuo y Welaya piensan que aun cuando la idea es atractiva hay un gran número de dificultades prácticas en su aplicación en el buque.

Como se puede observar en este breve resumen del desarrollo y estado actual del problema de estabilidad en buques, la tendencia clara actual es el análisis de la situación corrió dinámica, es decir, estudiarla a través de tratamientos teóricos para predecir el comportamiento de *roll* del buque en olas.

Sin embargo en estos métodos teóricos existe un tratamiento, en algunos casos, muy complejo, que obligaría al proyectista a mantener una agilidad matemática y de computación muy alta, y un gran respaldo de *hardware* y *software* computacional. Esto en astilleros pequeños de cualquier país como el nuestro, sin un gran desarrollo de la industria de construcción naval, llega a ser antieconómico y probablemente sólo entrabaría el problema al proyectar o modificar un buque (si se deseara imponer estos métodos puramente teóricos). Esto, además, es causa clara de la gran dominación y aceptación que tiene el método de calcular la estabilidad estática, mediante curvas cruzadas, criterios, etc., lo que hasta lleva a creer erróneamente que es el único método de análisis de estabilidad, o que es el mejor.

A raíz de esta complejidad, la práctica en la mayoría de los países ha sido optar por la solución teórico-experimental, esto, es usando modelos a escala reducida, ensayados en olas, en tanque de pruebas. Así se puede usar la teoría para detectar probables problemas de estabilidad (y otros problemas en olas) y medir estos fenómenos en el laboratorio, extrapolando posteriormente para obtener los valores que se esperarían en el buque real.

A este respecto es interesante destacar que nuestro país, aun cuando no tiene una industria naval relevante, cuenta con una instalación para estos fines. En efecto, en la ciudad de Valdivia —y dependiente del Instituto Profesional de esa ciudad— se encuentra ubicado un tanque de pruebas (o canal de pruebas) con 45 metros de longitud, y aun cuando está destinado básicamente como laboratorio para docencia e investigación ha venido año a año incorporando equipamientos nuevos perfectamente aptos para asesoría a la industria, estando a la fecha en condiciones de realizar diversos tipos de ensayos y observaciones de modelos en aguas tranquilas y en olas, dada la reciente instalación de un generador de olas de tipo *flap*, capaz de generar estados de oleaje regular de diferente altura y longitud, el cual ha comenzado a operar a fines de 1984.

Siendo los buques artefactos cuyo perfil de misión siempre significa pasar el 90% y más de su vida útil en el mar (en olas), obviamente, el éxito o fracaso de su operación depende fuertemente de su *performance* en olas. Tal es así, que incluso la Organización Marítima Intergubernamental viene estudiando y lanzará en un futuro próximo, modificaciones a los

criterios de estabilidad puramente estáticos, para incluir con simplicidad de uso para el ingeniero naval, elementos de control y regulaciones para comportamiento en olas.

Después de todo, la estabilidad de movimientos y en particular la estabilidad transversal, es requerimiento esencial y extremadamente relevante en la seguridad operativa de buques y estructuras flotantes, en general.

Todo lo anterior implicaría para el ingeniero naval o para el profesional del área de ingeniería naval la posibilidad (o ¿responsabilidad?) de comenzar a incluir gradualmente en estas materias tecnología y métodos modernos que en último análisis vengán a incidir beneficiosamente en su área de gestión, en una cada vez mayor independencia tecnológica y en un eficiente desarrollo marítimo general.